This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

THE UNIVERSITY OF MICHIGAN
LIBRARIES
THE UNIVERSITY OF MICHIGAN
1817

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

AVIS

Les paragraphes et les chapitres marqués d'un astérisque (*) ne sont pas compris dans le programme d'enseignement des lycées, mais ils le sont dans les programmes des facultés de médecine et des facultés des sciences

Tout ce qui est imprimé en petit caractère sera omis par les lecteurs qui ne sont pas familiarisés avec le calcul algébrique.

Les nombres placés au-dessous des dessins, à droite des numéros d'ordre, indiquent, en centimètres, la hauteur des appareils, ou leur longueur dans le sens horizontal, suivant que ces nombres sont précédés des lettres *h* ou *l*.

Tous nos dessins étant originaux et pris, en général, dans notre cabinet de physique, la reproduction en est interdite et sera poursuivie en contrefaçon; il en sera de même, en vertu des traités internationaux, de toute traduction non autorisée par l'auteur.

OUVRAGE DU MÊME AUTEUR

COURS DE PHYSIQUE PUREMENT EXPÉRIMENTALE

A l'usage des gens du monde, des aspirantes au brevet supérieur, des élèves des écoles normales, des institutions de demoiselles, et généralement des personnes étrangères aux connaissances mathématiques.

Ouvrage de luxe, orné de 308 magnifiques vignettes, dont *pas une seule* n'est la reproduction de celles du présent ouvrage.

Prix broché : 5 fr. 50 c.

Même prix par la poste, en adressant *franco* à l'auteur rue de Vaugirard, 17, un bon de poste de 5 fr. 50 c.

PARIS. — IMPRIMERIE DE J. CLAYE, RUE SAINT-BENOIT, 7.

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

1744

DE PHYSIQUE

EXPÉRIMENTALE ET APPLIQUÉE

ET DE

MÉTÉOROLOGIE

SUIVI D'UN RECUEIL NOMBREUX DE PROBLÈMES

ET ILLUSTRÉ DE 500 BELLES GRAVURES SUR BOIS INTERCALÉES DANS LE TEXTE

A l'usage des Établissements d'instruction, des aspirants aux grades des Facultés et des candidats aux diverses écoles du Gouvernement

PAR Adolphe GANOT

PROFESSEUR DE MATHÉMATIQUES ET DE PHYSIQUE

HUITIÈME ÉDITION

AUGMENTÉE DE 10 GRANDS BOIS NOUVEAUX
ET DES TRAVAUX LES PLUS RÉCENTS SUR LES DIFFÉRENTES BRANCHES
DE LA PHYSIQUE

A PARIS

CHEZ L'AUTEUR-ÉDITEUR

12, RUE DE L'ÉPERON, PRÈS DE L'ÉCOLE DE MÉDECINE,
ET 17, RUE DE VAUGIRARD.

1859

L'Auteur-Éditeur se réserve le droit de traduction et de reproduction à l'étranger.

QC
21
.G19
1859

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

LIVRE PREMIER

DE LA MATIÈRE, DES FORCES ET DU MOUVEMENT

CHAPITRE PREMIER

NOTIONS GÉNÉRALES.

1. **Objet de la physique.** — La *physique* a pour objet l'étude des phénomènes que présentent les corps, en tant que ceux-ci n'éprouvent pas de changement dans leur composition.

La *chimie*, au contraire, traite particulièrement des phénomènes qui modifient plus ou moins profondément la nature des corps.

2. **Matière.** — On nomme *matière* ou *substance* tout ce qui tombe immédiatement sous nos sens.

On connaît aujourd'hui soixante-deux substances élémentaires ou *simples*, c'est-à-dire dont l'analyse chimique ne parvient à extraire qu'une seule espèce de matière. Mais il est possible que plus tard le nombre de ces substances augmente ou diminue, car on peut en découvrir de nouvelles, comme il peut arriver qu'on parvienne à en décomposer plusieurs.

3. **Corps, atomes, molécules.** — Toute quantité de matière limitée est un *corps*. Les propriétés des corps font voir qu'ils ne sont point formés d'une matière continue, mais d'éléments pour ainsi dire infiniment petits, qui ne peuvent être divisés physiquement,

et sont simplement juxtaposés sans se toucher, étant maintenus à distance par des attractions et des répulsions réciproques qu'on désigne sous le nom de *forces moléculaires*.

Ces éléments des corps se nomment *atomes*. Un groupe d'atomes forme une *molécule*. Les corps ne sont que des agrégats de molécules.

4. **Masse.** — En physique, on entend par *masse* d'un corps la quantité de matière qu'il contient. En mécanique, cette définition est insuffisante, et on est obligé de la compléter, comme nous le verrons ci-après (35).

5. **États des corps.** — On distingue trois états des corps :

1° L'*état solide*, qui s'observe, aux températures ordinaires, dans les bois, les pierres, les métaux. Cet état est caractérisé par une adhérence telle, entre les molécules, qu'on ne peut les séparer que par un effort plus ou moins considérable. C'est en vertu de cette adhérence que les corps solides conservent par eux-mêmes la forme que la nature ou l'art leur a donnée.

2° L'*état liquide*, que présentent l'eau, l'alcool, les huiles. Le caractère distinctif des liquides est une adhérence si faible entre leurs molécules, qu'elles peuvent glisser les unes sur les autres avec une extrême facilité; d'où il résulte que ces corps n'affectent aucune forme particulière, et prennent toujours celle des vases qui les contiennent.

3° L'*état gazeux*, qui se rencontre dans l'air et dans un grand nombre d'autres corps qu'on nomme *gaz* ou *fluides aériformes*. Dans les gaz, la mobilité des molécules est encore plus grande que dans les liquides ; mais leur caractère distinctif est surtout une tendance à prendre sans cesse un volume plus grand, propriété qu'on désigne sous le nom d'*expansibilité*, et qui sera constatée bientôt par l'expérience (127).

Les liquides et les gaz se désignent sous le nom général de *fluides*.

La plupart des corps simples et beaucoup de corps composés peuvent successivement se présenter à l'état solide, liquide ou gazeux, suivant les variations de température. L'eau nous en offre un exemple bien connu.

En avançant dans l'étude de la physique, on reconnaîtra que c'est du rapport entre les attractions et les répulsions moléculaires que dépendent principalement les trois états des corps.

6. **Phénomènes physiques.** — Tout changement survenu dans l'état d'un corps, sans altération de sa composition, est un *phéno-*

mène physique. Un corps qui tombe, un son qui se produit, de l'eau qui se congèle, sont des phénomènes.

7. **Lois et théories physiques.** — On nomme *loi physique* la relation constante qui existe entre un phénomène et sa cause. Par exemple, on démontre qu'un volume donné de gaz devient deux, trois fois moindre, lorsqu'il supporte une pression deux, trois fois plus grande : c'est là une loi physique qu'on exprime en disant que les volumes des gaz sont en raison inverse des pressions.

Une *théorie physique* est l'ensemble des lois qui se rapportent à une même classe de phénomènes. C'est ainsi qu'on dit : la théorie de la lumière, la théorie de l'électricité. Cependant, cette dénomination s'applique aussi, dans un sens plus restreint, à l'explication de certains phénomènes particuliers ; par exemple, lorsqu'on dit : la théorie de la rosée, la théorie du mirage.

8. **Agents physiques.** — Comme cause des phénomènes que présentent les corps, on admet l'existence d'*agents physiques* ou de *forces naturelles* qui régissent la matière.

Ces agents sont : l'*attraction universelle*, le *calorique*, la *lumière*, le *magnétisme* et l'*électricité*.

Les agents physiques ne se manifestant à nous que par leurs effets, leur nature nous est complétement inconnue. Dans l'état actuel de la science, on ne peut dire si ce sont des propriétés inhérentes à la matière, ou bien des matières subtiles, impalpables, répandues dans tout l'univers, et dont les effets sont le résultat de mouvements particuliers imprimés à leur masse. Cette dernière hypothèse est généralement admise ; mais alors ces matières sont-elles distinctes les unes des autres, ou doivent-elles être rapportées à une source unique? Cette dernière opinion paraît tendre à prévaloir à mesure que les sciences physiques reculent leurs limites.

Dans l'hypothèse où les agents physiques seraient des matières subtiles, ces matières n'ayant pas un poids appréciable aux balances les plus sensibles, on leur donne le nom de *fluides impondérables;* de là la distinction de *matière pondérable*, ou matière proprement dite, et de *matière impondérable*, ou *agents physiques*.

On donne aussi aux fluides impondérables le nom de *fluides incoercibles*, pour exprimer qu'on ne peut ni les saisir ni les comprimer en vase clos, comme l'air et les autres gaz.

CHAPITRE II.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS.

9. **Diverses sortes de propriétés.** — On entend par *propriétés* des corps, ou de la matière, leurs diverses manières de se présenter à nos sens. On en distingue de *générales* et de *particulières*. Les premières sont celles qui conviennent à tous les corps, sous quelque état qu'on les considère. Celles qu'il importe de connaître dès à présent sont : l'*impénétrabilité*, l'*étendue*, la *divisibilité*, la *porosité*, la *compressibilité*, l'*élasticité*, la *mobilité* et l'*inertie*.

Les propriétés particulières sont celles qu'on n'observe que dans certains corps ou dans certains états des corps, tels sont : la *solidité*, la *fluidité*, la *ténacité*, la *ductilité*, la *malléabilité*, la *dureté*, la *transparence*, la *coloration*, etc.

Il ne sera question, pour le moment, que des propriétés générales énoncées ci-dessus ; en observant, toutefois, que l'*impénétrabilité* et l'*étendue* sont moins des propriétés générales de la matière que des attributs essentiels qui suffiraient pour la définir. Remarquons encore que la divisibilité, la porosité, la compressibilité et l'élasticité ne s'appliquent qu'aux corps considérés comme des amas de molécules, et non aux atomes.

10. **Impénétrabilité.** — L'*impénétrabilité* est la propriété en vertu de laquelle deux éléments matériels ne peuvent occuper simultanément le même lieu de l'espace.

Cette propriété ne se rencontre réellement que dans les atomes. Dans un grand nombre de phénomènes, les corps paraissent se pénétrer. Par exemple, pour plusieurs alliages, le volume est moindre que la somme des volumes des métaux alliés. Lorsqu'on mélange de l'eau avec de l'acide sulfurique ou avec de l'alcool, on remarque une contraction dans le volume total. Mais toutes ces pénétrations ne sont qu'apparentes ; elles résultent uniquement de ce que les parties matérielles dont les corps sont formés ne se touchant pas, il existe entre elles des intervalles qui peuvent être occupés par d'autres matières, ainsi qu'on le verra à l'article *Porosité* (15).

11. **Étendue.** — L'*étendue* est la propriété qu'a tout corps d'occuper une portion limitée de l'espace.

Un grand nombre d'instruments ont été construits pour mesurer l'étendue. Nous ferons connaître ici le vernier et la vis micrométrique.

12. Vernier. — Le *vernier* tire son nom de celui de son inventeur, mathématicien français mort en 1637. Cet instrument fait partie de plusieurs appareils de physique, comme les baromètres, les cathétomètres. Il est formé de deux règles : la plus grande, AB (fig. 1), est fixe et divisée en parties égales ; la plus petite, *ab*, est mobile ; c'est elle qui est proprement le vernier. Pour la graduer, on lui donne une longueur égale à 9 des divisions de la

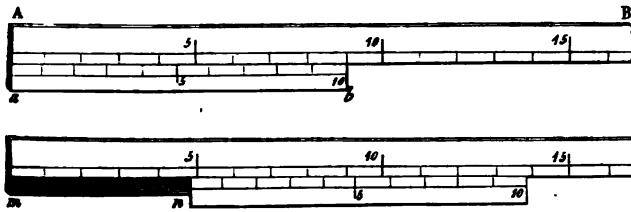


Fig. 1.

grande règle, puis on la divise en 10 parties égales. Il en résulte que chaque division de la règle *ab* est plus petite que celle de la règle AB d'un dixième.

Cela posé, soit à mesurer la longueur d'un objet *mn*. On le place, comme on le voit dans la figure, le long de la grande règle, et on trouve ainsi que cet objet a, par exemple, une longueur égale à 4 unités plus une fraction. C'est cette fraction que le vernier va servir à évaluer. Pour cela, on le fait glisser sur la règle fixe jusqu'à ce qu'il vienne se placer à l'extrémité de l'objet *mn*, puis on cherche où se fait la coïncidence entre les divisions des deux règles. Dans notre dessin, elle a lieu à la huitième division du vernier, à partir du point *n*. Cela indique que la fraction à mesurer est égale à 8 dixièmes. En effet, les divisions du vernier étant plus petites que celles de la règle, d'un dixième, on voit qu'à partir du point de coïncidence, en allant de droite à gauche, elles sont successivement en retard, sur celle de la règle, d'un, de deux, de trois... dixièmes. De l'extrémité *n* du vernier à la quatrième division de la règle, il y a donc 8 dixièmes ; d'où *mn* égale 4 des divisions de AB plus 8 dixièmes. Par conséquent, si les divisions de la grande règle sont des millimètres, on aura la longueur de *mn* à un dixième

de millimètre près. Pour l'obtenir à un vingtième, à un trentième de millimètre, il faudrait diviser AB en millimètres, en porter 19 ou 29 sur le vernier, puis diviser celui-ci en 20 ou 30 parties égales. Mais pour distinguer où se ferait alors la coïncidence, il faudrait faire usage d'une loupe. Dans la mesure des arcs, on fait aussi usage du vernier pour évaluer, en minutes et en secondes, les fractions de degré.

* 13. **Vis micrométrique, machine à diviser.** — On nomme *vis micrométrique* toute vis qu'on emploie pour mesurer avec précision des longueurs ou des épaisseurs. Lorsqu'une vis est bien exécutée, son *pas*, c'est-à-dire l'intervalle de deux filets consécutifs, doit être partout le même; d'où il résulte que si la vis tourne dans un écrou fixe, elle avance, à chaque tour, d'une longueur égale à celle du pas; et que pour une fraction de tour, $\frac{1}{10}$, par exemple, elle n'avance que de $\frac{1}{10}$ du pas. Par conséquent, si le pas est d'un millimètre, et si, à l'extrémité de la vis, est un cercle gradué en 360 degrés, et tournant avec elle, en ne faisant marcher ce cercle que d'une division, on fera avancer la vis de $\frac{1}{360}$ de millimètre. Au lieu d'un écrou fixe et d'une vis mobile, on peut adopter le principe inverse, c'est-à-dire que c'est la vis qui est fixe, et l'écrou qui est mobile et avance d'une quantité aussi petite qu'on le veut.

C'est sur ce principe qu'est fondée la machine à diviser représentée dans la figure 2, laquelle a été construite dans les ateliers de M. Duboscq. Elle se compose d'un banc en fonte AQ, sur lequel est montée une longue vis H, dont le filet doit être parfaitement régulier. Cette vis tourne, à ses deux extrémités, dans deux collets en acier, fixés au banc A, lesquels ne sont pas visibles dans le dessin. Cette vis est fixe, c'est-à-dire qu'elle tourne seulement sur elle-même, mais n'avance pas dans le sens de sa longueur. En tournant, elle fait avancer un écrou fixé au-dessous du chariot B, et celui-ci, entraîné par l'écrou, glisse à frottement doux de Q vers H, sur le banc A. La pièce P, qui porte un burin *a* et en règle la course, est fixée sur le banc de fonte et ne se déplace jamais.

Quant au mouvement de la vis H, il se produit de la manière suivante : à l'aide d'une manivelle M, on fait tourner deux roues d'angle *m* et *n*, dont l'axe de la dernière porte trois roues *o*, *p*, *r*, invariablement liées entre elles, mais indépendantes de la vis, du moins dans un sens. Pour cela, dans l'intérieur de la roue *p* est un encliquetage qui engrène dans une roue à rochet fixée à la vis, et fait tourner cette roue et la vis quand on tourne la manivelle de gauche à droite; mais lorsqu'on tourne de droite à gauche, l'en-

cliquetage n'engrène plus et la roue *p* tourne sans faire tourner la vis.

Il reste à régler l'angle dont doivent tourner les roues *o*, *p*, *r*, et avec elles la vis H. Pour cela, sur le contour de la roue *p*, sont tracés trois filets qui, agissant comme vis sans fin, engrènent dans les dents d'une roue *u*. Celle-ci porte un taquet *x*, qu'on fixe à

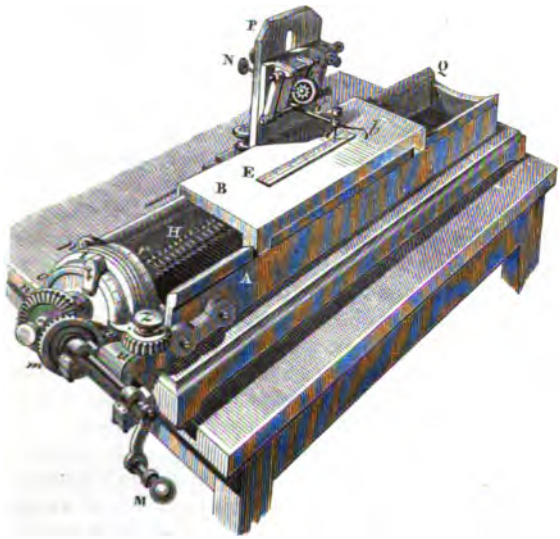


Fig. 2 (l = 65).

l'aide d'une vis de pression *z*, à une distance voulue d'un second taquet masqué par la vis *z*, et lié invariablement à la roue *u*. Enfin, les deux roues *o* et *r* étant divisées en 360 degrés, on voit sur la première une petite pièce saillante *i*, qui vient butter contre le taquet *x* et arrête le mouvement. Sur la roue *r*, en dessous, est un buttoir semblable qui est arrêté par le second taquet fixé à la roue *u*. Le buttoir de la roue *r* lui est invariablement fixé, mais le buttoir *i* de la roue *o* peut se fixer en tel point qu'on le veut sur cette roue. De plus, ce buttoir rencontre le taquet *x* quand on tourne de gauche à droite, tandis que celui de la roue *r* rencontre son taquet quand on tourne de droite à gauche.

Cela posé, s'agit-il de faire tourner la vis d'un dixième de tour, par exemple, on place le buttoir *i*, dans le sens de la circonférence, à une distance de 36 degrés du buttoir de la roue *r*. On tourne alors la manivelle M de droite à gauche jusqu'à ce que le buttoir de la roue *r* frappe contre son taquet; puis, recommençant de gauche à droite, la roue *p* entraîne maintenant la vis H dans son mouvement, et quand le buttoir *i* frappe en *x*, la vis a tourné de 36 degrés, c'est-à-dire d'un dixième de tour. Si donc le pas de la vis est d'un millimètre, le chariot et l'écrou qui est au-dessous auront marché d'un dixième de millimètre.

Le mouvement du chariot étant ainsi réglé, on fixe dessus, avec du mastic, la plaque E, qu'on veut diviser. Les traits se font à l'aide d'un burin *a*, chargé d'un poids. Quand le chariot marche, on soulève le burin à la main au moyen d'une tige *b*; quand il est arrêté, on tire sur cette tige, et le trait se fait.

La longueur des traits devant varier de 5 en 5 et de 10 en 10, la course du burin est réglée par une roue intérieure que fait marcher un encliquetage *ke*, à chaque mouvement du burin. Cette roue est entaillée, sur son contour, de petites rainures inégalement profondes dans lesquelles s'engage une tige N, qui participe au mouvement en avant du burin. Plus une rainure est profonde, plus la course du burin est grande, et il trace alors les plus longues divisions.

14. **Divisibilité.** — La *divisibilité* est la propriété que possède tout corps de pouvoir être séparé en parties distinctes.

On peut citer de nombreux exemples de l'extrême divisibilité de la matière. Par exemple, 5 centigrammes de musc suffisent pour répandre, pendant plusieurs années, des particules odorantes dans un appartement dont l'air est fréquemment renouvelé.

Le sang est composé de globules rouges, flottant dans un liquide nommé *sérum*. Dans l'homme, ces globules, qui sont sphériques, ont un diamètre d'un cent cinquantième de millimètre, et la goutte de sang qui peut être suspendue à la pointe d'une aiguille, en contient près d'un million.

Enfin, il existe des animaux trop petits pour être aperçus à l'œil nu, et dont l'existence nous serait inconnue sans le secours du microscope. Or, ces animaux se meuvent, se nourrissent; ils ont donc des organes. Par conséquent, quelle ne doit pas être l'extrême ténuité des particules dont ceux-ci sont composés!

La divisibilité des corps étant poussée assez loin pour que leurs particules échappent au toucher et à la vue, même avec l'aide des microscopes les plus grossissants, on ne peut constater par l'expé-

rience si la divisibilité de la matière a une limite ou si elle est indéfinie. Cependant, d'après la stabilité des propriétés chimiques particulières à chaque corps, et d'après l'invariabilité des rapports qui existent entre les poids des éléments qui se combinent, on admet qu'il y a une limite à la divisibilité. C'est pour cela qu'on regarde les corps comme formés d'éléments matériels qui ne sont pas susceptibles d'être divisés et qu'on appelle *atomes*, c'est-à-dire insécables (3).

Fig. 3.

15. **Porosité.** — La *porosité* est la propriété en vertu de laquelle il existe, entre les molécules des corps, des interstices auxquels on donne le nom de *pores*.

On distingue deux espèces de pores : les *pores physiques*, ou interstices assez petits pour que les forces moléculaires attractives ou répulsives conservent leur action ; et les *pores sensibles*, véritables trous ou lacunes, au delà desquels les forces moléculaires n'ont plus d'action. C'est aux pores physiques que sont dues les contractions et les dilatations qui proviennent des variations de température. Ce sont les pores sensibles qui, dans les êtres organisés, sont le siége des phénomènes d'exhalation et d'absorption.

Les pores sensibles sont apparents dans les éponges, les bois, et dans un grand nombre de pierres. Les pores physiques ne le sont dans aucun cas. Cependant, tous les corps diminuant de volume par le refroidissement et par la compression, on en conclut que tous ont des pores physiques.

Pour montrer expérimentalement les pores sensibles, on prend un long tube de verre A (fig. 3), terminé, à sa partie supérieure, par un godet de cuivre *m*, et, à sa partie inférieure, par un pied de même métal qui peut se visser sur la platine P d'une machine à faire le vide. Le fond du godet *m* est formé d'un cuir épais de

buffle *o*. On y verse du mercure de manière à recouvrir entièrement le cuir, puis on fait le vide dans le tube. Aussitôt, par l'effet de la pression atmosphérique qui pèse sur le mercure, ce liquide passe à travers les pores du cuir et tombe dans le tube sous forme d'une pluie fine. On fait passer de la même manière de l'eau à travers les pores du bois, lorsqu'on substitue au cuir ci-dessus un disque de bois coupé perpendiculairement aux fibres.

Si l'on plonge dans l'eau un morceau de craie, on en voit sortir une série de petites bulles d'air. Cet air occupait évidemment les pores de la craie, d'où il est chassé par l'eau qui y pénètre. En effet, si l'on pèse la pierre avant et après son immersion, on observe que son poids est considérablement augmenté. On peut même mesurer ainsi le volume total des pores d'après le poids de l'eau absorbée.

Quant à la porosité des métaux, elle a été démontrée par l'expérience suivante, due aux académiciens de Florence, en 1661. Cherchant à constater si l'eau pouvait diminuer de volume par l'effet d'une forte pression, ils prirent une petite sphère creuse en or, à paroi mince, la remplirent d'eau, et après avoir fermé hermétiquement la sphère en en soudant l'orifice, ils la frappèrent à coups de marteau pour en réduire le volume. Or, à chaque coup, l'eau suintait à travers la paroi, et apparaissait à l'extérieur comme un dépôt de rosée, ce qui démontrait la porosité du métal. Plusieurs physiciens ont répété cette expérience sur d'autres métaux et sont arrivés au même résultat.

16. **Volume apparent et volume réel.** — Eu égard à la porosité, il y a lieu de distinguer, dans tout corps, le *volume apparent*, c'est-à-dire la portion de l'espace qu'occupe le corps, et le *volume réel*, qui serait celui qu'occuperait la matière propre du corps, si les pores pouvaient être anéantis; en d'autres termes, le volume réel est le volume apparent diminué du volume des pores. Le volume réel d'un corps est invariable; mais le volume apparent diminue ou augmente avec le volume des pores.

17. **Applications.** — La porosité a été utilisée dans les filtres en papier, en feutre, en pierre, en charbon, dont on fait un fréquent usage dans l'économie domestique. Les pores de ces substances sont assez grands pour laisser passer les liquides, mais ils sont trop petits pour laisser passer les substances que ceux-ci tiennent en suspension. Dans les carrières, on pratique, dans les blocs de pierre, des rainures où l'on introduit des coins de bois bien sec; ceux-ci étant ensuite humectés, l'eau pénètre dans leurs pores, le bois se gonfle et détache des blocs considérables. Les cordes sèches,

si on les mouille, augmentent en diamètre et diminuent en longueur; de là un moyen puissant qui a été utilisé pour soulever d'énormes fardeaux.

18. **Compressibilité.** — La *compressibilité* est la propriété qu'ont les corps de pouvoir se réduire à un moindre volume par l'effet de la pression. Cette propriété est la conséquence de la porosité, dont elle est elle-même une preuve.

La compressibilité est très-variable d'un corps à un autre. Les corps les plus compressibles sont les gaz, qui peuvent être réduits, sous des pressions suffisantes, à un volume 10, 20 et même 100 fois plus petit que celui qu'ils occupent dans les conditions ordinaires. Toutefois, pour la plupart des gaz, on rencontre une limite de pression au delà de laquelle l'état gazeux ne persiste plus, mais est remplacé par l'état liquide.

La compressibilité des solides est bien moindre que celle des gaz, et se présente à des degrés très-différents. Les étoffes, le papier, le liége, le bois, sont les substances les plus compressibles. Les métaux le sont aussi, comme l'indiquent les empreintes que prennent les médailles sous le choc du balancier. Il est à remarquer que la compressibilité des solides a aussi une limite au delà de laquelle les corps, cédant à la pression, se désagrégent tout à coup et se réduisent souvent en poudre impalpable.

Quant aux liquides, leur compressibilité est tellement faible qu'ils ont été longtemps regardés comme tout à fait incompressibles. Mais elle se constate par l'expérience, ainsi qu'il sera démontré en hydrostatique (79).

19. **Élasticité.** — L'*élasticité* est la propriété qu'ont les corps de reprendre leur forme ou leur volume primitif, lorsque la force qui altérait cette forme ou ce volume cesse d'agir. L'élasticité peut être développée dans les corps par pression, par traction, par flexion ou par torsion. Il ne sera question ici, comme propriété générale, que de l'élasticité de pression; les autres espèces d'élasticité, ne pouvant se produire que dans les solides, seront placées au nombre des propriétés particulières à ces corps (69).

Les gaz sont parfaitement élastiques; c'est-à-dire qu'ils reprennent exactement le même volume aussitôt que la pression redevient la même. Il en est encore ainsi des liquides, à quelque pression qu'ils aient été soumis. Aucun corps solide n'est doué d'une élasticité aussi parfaite que les gaz et les liquides, surtout lorsque les pressions ont été longtemps prolongées. Cependant l'élasticité est très-apparente dans le caoutchouc, l'ivoire, le verre,

le marbre; elle est à peine sensible dans les graisses, les argiles, le plomb.

Dans les solides, il y a une limite d'élasticité au delà de laquelle ils sont brisés, ou, du moins, ne reprennent plus exactement leur forme ou leur volume primitif. Dans les entorses, par exemple, la limite d'élasticité des ligaments a été dépassée. Une semblable limite ne se rencontre pas dans les gaz et les liquides, qui reviennent toujours à leur volume primitif.

L'élasticité est le résultat d'un rapprochement moléculaire et, par suite, d'un changement de forme qui, dans les corps solides, se constate par l'expérience suivante : sur un plan de marbre poli et recouvert d'une légère couche d'huile, on laisse tomber une petite bille d'ivoire, de verre ou de marbre. Elle rebondit à une hauteur un peu moindre que celle de la chute, après avoir produit, au point où elle a frappé, une empreinte circulaire d'autant plus étendue, que la bille est tombée d'une plus grande hauteur. Au moment du choc, la bille a donc été aplatie sur le plan, et c'est par la réaction des molécules ainsi comprimées qu'elle se relève.

20. **Mobilité, mouvement, repos.** — La *mobilité* est la propriété qu'ont les corps de pouvoir passer d'un lieu dans un autre.

On nomme *mouvement* l'état d'un corps qui change de lieu; *repos*, sa permanence dans le même lieu. Le repos et le mouvement sont absolus ou relatifs.

Le *repos absolu* serait la privation complète de mouvement. Dans tout l'univers, on ne connaît aucun corps dans cet état.

Le *mouvement absolu* d'un corps serait son déplacement par rapport à un autre corps à l'état de repos absolu.

Le *repos relatif*, ou apparent, est l'état d'un corps qui paraît fixe par rapport aux corps environnants, mais qui, en réalité, participe avec eux à un mouvement commun. Par exemple, un corps qui reste à la même place dans un bateau en mouvement, est en repos par rapport au bateau, mais il est réellement en mouvement par rapport aux rives; ce n'est donc là qu'un repos relatif.

Le *mouvement relatif* d'un corps n'est que son mouvement apparent, c'est-à-dire celui qu'on mesure par rapport à d'autres corps qu'on suppose fixes, tandis qu'eux-mêmes se déplacent. Telle est le mouvement d'un bateau par rapport aux rives d'un fleuve; car celles-ci participent, avec lui, au double mouvement de rotation et de translation de la terre dans l'espace.

On n'observe, dans la nature, que des états de repos et de mouvements relatifs.

21. **Inertie.** — L'*inertie* est une propriété purement négative : c'est l'inaptitude de la matière à passer d'elle-même de l'état de repos à l'état de mouvement, ou à modifier le mouvement dont elle est animée.

Si les corps tombent lorsqu'on les abandonne à eux-mêmes, cela provient d'une force attractive qui les dirige vers le centre de la terre, et non de leur spontanéité; si la vitesse d'une bille sur un billard se ralentit graduellement, cela résulte de la résistance de l'air que la bille déplace, et du frottement sur le tapis. Il ne faudrait donc pas en conclure que cette bille a une tendance au repos plutôt qu'au mouvement, comme le disaient certains philosophes de l'antiquité, qui comparaient la matière à une personne paresseuse. Toutes les fois qu'il n'y a pas de résistance, le mouvement se continue sans altération, ainsi que les astres nous en offrent un exemple dans leur révolution autour du soleil.

22. **Applications.** — Un grand nombre de phénomènes s'expliquent par l'inertie de la matière. Par exemple, lorsque, pour franchir un fossé, nous prenons notre élan, c'est afin qu'au moment du saut, le mouvement dont nous sommes animés ajoute son effet à l'effort musculaire que nous faisons pour sauter.

Une personne qui descend d'une voiture en marche, participe au mouvement de cette voiture, et si elle n'imprime à son corps un mouvement en sens contraire, à l'instant où elle touche le sol, elle est renversée dans la direction que suit la voiture.

C'est l'inertie qui rend si terribles les accidents de chemins de fer. En effet, que la locomotive vienne brusquement à s'arrêter, tout le convoi continue sa marche, en vertu de sa vitesse acquise, et les wagons vont se briser les uns contre les autres.

Enfin, les marteaux, les pilons, les bocards, sont des applications de l'inertie. Il en est de même de ces énormes roues en fonte qu'on nomme *volants*, et qui servent à régulariser le mouvement des machines à vapeur.

CHAPITRE III.

NOTIONS SUR LES FORCES ET LES MOUVEMENTS.

23. **Forces.** — On nomme *force* toute cause capable de produire le mouvement ou de le modifier.

L'action des muscles chez les animaux, la pesanteur, les attractions et les répulsions magnétiques ou électriques, la tension des vapeurs, sont des forces.

En général, on donne le nom de *puissances* aux forces qui tendent à produire un certain effet, et celui de *résistances* aux forces qui s'opposent à cet effet. Les premières, tendant à accélérer, à chaque instant, le mouvement, sont dites *accélératrices;* les dernières sont *retardatrices.*

Les forces peuvent n'agir sur les corps que pendant un temps très-court, comme il arrive dans les chocs, dans l'explosion de la poudre, ou bien pendant toute la durée du mouvement. On exprime le premier effet en disant qu'elles sont *instantanées*, le second en disant qu'elles sont *continues;* mais il importe d'observer qu'on entend par là non pas deux espèces de forces, mais seulement deux modes d'action des forces.

24. Équilibre. — Lorsque plusieurs forces sont appliquées à un même corps, il peut arriver que, ces forces se neutralisant mutuellement, l'état de repos ou de mouvement du corps ne soit pas modifié. On a donné à cet état particulier des corps le nom d'*équilibre*. Il ne faut pas confondre l'état d'équilibre avec celui de repos : dans le premier état, un corps est soumis à l'action de plusieurs forces qui s'entre-détruisent; dans le second, il n'est sollicité par aucune force.

25. Caractères, unité et représentation des forces. — Toute force est caractérisée : 1° par son *point d'application*, c'est-à-dire le point où elle agit immédiatement; 2° par sa *direction*, c'est-à-dire la ligne droite qu'elle tend à faire parcourir à son point d'application; 3° par son *intensité*, c'est-à-dire sa valeur par rapport à une autre force prise pour unité.

La force qu'on choisit pour unité est tout à fait arbitraire; mais, quel que soit l'effet de traction ou de pression produit par une force, un certain poids pouvant toujours produire le même effet, on compare, en général, les forces à des poids, et on prend pour unité de force le kilogramme. Une force est égale à 20 kilogrammes, par exemple, si elle peut être remplacée par l'action d'un poids de 20 kilogrammes. Une force qui conserve toujours la même intensité est *constante;* mais celle dont l'intensité augmente ou diminue, est *variable.*

D'après les caractères qui déterminent une force, celle-ci est complétement connue lorsque son point d'application, sa direction et son intensité sont donnés. Pour représenter ces divers éléments

d'une force, on fait passer par son point d'application, et dans le sens de sa direction, une ligne droite indéfinie; puis, sur cette ligne, à partir du point d'application, et dans le sens de la force, on porte une unité de longueur arbitraire, le centimètre, par exemple, autant de fois que la force donnée contient elle-même l'unité de force. On a ainsi une ligne droite qui détermine complétement la force. Enfin, pour distinguer les forces les unes des autres, on les désigne par les lettres P, Q, R..., qu'on place sur leurs directions respectives.

Pour l'intelligence de plusieurs phénomènes physiques, il est nécessaire de rappeler ici les principes suivants qui sont démontrés dans les cours de mécanique.

26. Résultantes et composantes. — Lorsque plusieurs forces

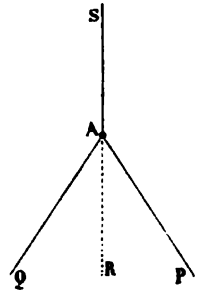


Fig. 4.

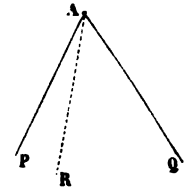


Fig. 5.

S, P, Q, appliquées à un même point matériel A (fig. 4), se font équilibre, l'une quelconque d'entre elles, S, par exemple, résiste seule à l'action de toutes les autres. La force S, si elle était dirigée en sens contraire, suivant le prolongement AR de SA, produirait donc, à elle seule, le même effet que le système des forces P et Q.

Toute force qui peut ainsi produire le même effet que plusieurs forces combinées, se nomme leur *résultante*, et les autres forces, par rapport à la résultante, sont ses *composantes*.

Lorsqu'un corps, sollicité par plusieurs forces, entre en mouvement, on démontre que c'est toujours suivant la direction de la résultante de toutes ces forces qu'il se meut. Par exemple, si un point matériel A (fig. 5) est sollicité en même temps par deux forces P et Q, comme il ne peut se mouvoir simultanément suivant les droites AP et AQ, il prend une direction intermédiaire AR,

qui est précisément celle de la résultante des deux forces P et Q.

Tous les problèmes sur la *composition* et la *décomposition* des forces s'appuient sur les théorèmes suivants, pour la démonstration desquels nous renvoyons aux traités spéciaux de mécanique.

27. Composition et décomposition des forces parallèles. — 1° *Lorsque deux forces parallèles sont appliquées à un même point, elles ont une résultante égale à leur somme, si elles sont de même direction, et à leur différence, si elles sont de direction contraire.* Par exemple, si deux hommes tirent un fardeau suivant des directions parallèles, avec les efforts respectifs 20 et 15, l'effort résultant est 35, ou 5, suivant qu'ils tirent dans le même sens ou en sens contraire. De même, lorsque plusieurs chevaux de trait sont attelés à une voiture, celle-ci avance comme si elle était sollicitée par une force unique égale à la somme des forces de chaque cheval.

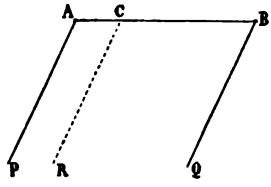


Fig. 6.

2° *Lorsque deux forces parallèles et de même direction sont appliquées aux extrémités d'une droite* AB (fig. 6), *leur résultante* R, *qui est égale à leur somme, leur est parallèle, et partage la droite* AB *en deux parties inversement proportionnelles aux forces* P *et* Q. En d'autres termes, C étant le point d'application de la résultante, si la force P est deux, trois fois plus grande que la force Q, la distance AC est deux, trois fois plus petite que CB. D'où il suit que lorsque les forces P et Q sont égales, la direction de leur résultante partage la ligne AB en deux parties égales.

Réciproquement, une force unique R, appliquée en C, peut être remplacée par le système de deux forces P et Q dont elle est la somme, si celles-ci lui sont parallèles, et si les points A, B, C, étant en ligne droite, ces nouvelles forces sont en raison inverse des longueurs AC et CB.

Pour obtenir la résultante de plusieurs forces parallèles et dirigées dans le même sens, on cherche d'abord, comme ci-dessus, la résultante de deux de ces forces, puis celle de la résultante trouvée et d'une troisième force, et ainsi de suite, jusqu'à la dernière; ce qui produit, pour résultante finale, une force égale à la somme des forces données, et de même direction.

28. Composition et décomposition des forces concourantes. — On appelle forces *concourantes* celles dont les directions se ren-

contrent en un même point où l'on peut les supposer toutes appliquées. Par exemple, lorsque plusieurs hommes, pour sonner une cloche, tirent des cordeaux fixés à un même nœud sur la corde de cette cloche, les forces de ces hommes sont concourantes.

Soient d'abord deux forces concourantes P et Q (fig. 7), et A leur point d'application. Si l'on prend sur leurs directions deux longueurs AB et AC proportionnelles à leurs intensités (25), et si, des points B et C, on tire des droites respectivement parallèles aux directions des forces, on obtient un parallélogramme ABCD qu'on nomme *parallélogramme des forces*, et qui fait connaître facilement la résultante des forces P et Q, au moyen du théorème suivant, connu lui-même sous le nom de *théorème du parallélogramme des forces*.

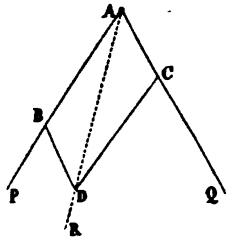


Fig. 7.

29. **Parallélogramme des forces.** — *La résultante de deux forces concourantes est représentée, en grandeur et en direction, par la diagonale du parallélogramme construit sur ces forces.* C'est-à-dire que, dans la figure ci-dessus, la résultante R des forces P et Q est non-seulement dirigée suivant la diagonale AD, mais contient l'unité de force autant de fois que cette diagonale contient elle-même l'unité linéaire qui a été portée sur AB et AC pour représenter les forces P et Q.

Réciproquement, une force unique peut être décomposée en deux autres appliquées au même point que la première et dirigées suivant des droites données. Il suffit, pour cela, de construire sur ces droites un parallélogramme dont la force donnée soit la diagonale; la longueur des côtés représentera les composantes cherchées.

Dans le cas d'un nombre quelconque de forces appliquées à un même point, dans diverses directions, la résultante s'obtient en appliquant successivement le théorème précédent d'abord à deux de ces forces, puis à la résultante obtenue et à une troisième force, et ainsi de suite jusqu'à la dernière.

Les effets de la composition et de la décomposition des forces se présentent constamment à notre observation. Par exemple, lorsqu'un bateau, mû par l'action des rames, traverse une rivière, il n'avance pas dans la direction suivant laquelle les rames le poussent; il ne suit pas non plus celle du courant, mais il va exacte-

ment dans la direction qui correspond à la résultante des deux impulsions auxquelles il est soumis.

NOTIONS SUR LES MOUVEMENTS.

30. **Différents genres de mouvements.** — On a déjà vu (20) que le *mouvement* est l'état d'un corps qui passe d'un lieu à un autre. Un mouvement est dit *rectiligne* ou *curviligne*, selon que le chemin parcouru par le mobile est une ligne droite ou une ligne courbe, et chacun de ces mouvements peut être lui-même *uniforme* ou *varié*.

31. **Mouvement uniforme.** — Le *mouvement uniforme*, le plus simple de tous, est celui dans lequel un mobile parcourt des espaces égaux dans des temps égaux.

Toute force instantanée produit un mouvement rectiligne et uniforme, lorsque le mobile n'est soumis à aucune autre force, et ne rencontre aucune résistance. En effet, la force n'agissant que pendant un temps très-court, le mobile, une fois abandonné à lui-même, conserve, en vertu de son inertie, la direction et la vitesse que la force lui a imprimées. Toutefois, les forces continues peuvent aussi donner naissance à des mouvements uniformes. Il en est ainsi lorsqu'il se présente des résistances qui, se renouvelant sans cesse, détruisent l'accroissement de vitesse que ces forces tendent à communiquer au mobile. Par exemple, un convoi qui, sur un chemin de fer, est sollicité par une force continue, n'en prend pas moins un mouvement uniforme ; ce qui résulte de ce que les pertes de force, dues à la résistance de l'air et au frottement, croissant avec la vitesse, il vient un moment où l'équilibre s'établit entre la force motrice et les résistances.

32. **Vitesse et loi du mouvement uniforme.** — Dans le mouvement uniforme, on nomme *vitesse* le chemin parcouru dans l'unité de temps. Cette unité, tout à fait arbitraire, est généralement la seconde. Il découle de la définition du mouvement uniforme que la vitesse est constante. Dans des temps deux, trois, quatre fois plus grands, les chemins parcourus sont donc doubles, triples, quadruples. Cette loi s'exprime en disant que *les espaces parcourus sont proportionnels aux temps, c'est-à-dire croissent comme les temps.*

Cette loi peut se représenter par une formule très-simple. Pour cela, soient v la vitesse, t le temps, et e l'espace parcouru. Puisque v représente l'espace parcouru dans

l'unité de temps, l'espace parcouru dans 2, 3...., unités de temps, sera $2v$, $3v$.....; et, enfin, dans le temps t, il sera t fois v; on a donc $e = vt$.

On tire de cette formule, $v = \frac{e}{t}$; par conséquent, on peut dire que, dans le mouvement uniforme, *la vitesse est le rapport du chemin parcouru au temps employé à le parcourir.*

33. **Mouvement varié.** — Le *mouvement varié* est celui dans lequel un mobile parcourt, en temps égaux, des espaces inégaux. Ce mouvement peut varier d'une infinité de manières; mais le seul qu'il importe de considérer ici est le mouvement uniformément varié.

Le *mouvement uniformément varié* est celui dans lequel les espaces parcourus augmentent ou diminuent, en temps égaux, constamment d'une même quantité (52, 2e *loi*, *conséquence*). Dans le premier cas, le mouvement est *uniformément accéléré :* tel est le mouvement d'un corps qui tombe, abstraction faite de la résistance de l'air. Dans le second, il est *uniformément retardé :* tel est le mouvement d'une pierre lancée verticalement de bas en haut.

Le mouvement uniformément varié a toujours pour cause une force continue constante, se comportant comme puissance ou comme résistance, suivant que le mouvement est accéléré ou retardé.

34. **Vitesse et loi du mouvement uniformément accéléré.** — Dans le mouvement uniformément accéléré, les espaces parcourus en temps égaux n'étant pas égaux, la vitesse n'est plus le chemin parcouru dans l'unité de temps, comme dans le mouvement uniforme. Ici, on entend par *vitesse*, en un instant donné, l'espace qui, à partir de cet instant, serait uniformément parcouru par le mobile, dans chaque seconde, si la force accélératrice cessait tout à coup, c'est-à-dire si le mouvement devenait uniforme. Par exemple, si l'on dit d'un mobile qu'il a une vitesse de 60 mètres après 10 secondes d'un mouvement uniformément accéléré, on exprime que si la force accélératrice qui a agi jusqu'alors cessait après 10 secondes, le mobile, en vertu de son inertie, continuerait à se mouvoir en parcourant uniformément 60 mètres par seconde.

Cela posé, tout mouvement uniformément accéléré, quel que soit son accroissement de vitesse, est soumis aux deux lois suivantes :

1° *Les vitesses croissent proportionnellement aux temps.* C'est-à-dire qu'après un temps double, triple, quadruple, la vitesse acquise est deux, trois, quatre fois plus grande.

En effet, la force continue, à laquelle est dû un mouvement accéléré, peut être assimilée à une suite d'impulsions égales qui se succèdent à des intervalles de temps égaux et infiniment petits. Or, chacune de ces impulsions produisant, dans chaque intervalle, une vitesse constante qui s'ajoute à celle que le mobile possédait déjà dans l'intervalle précédent, il en résulte que la vitesse va constamment en croissant de quantités égales en temps égaux.

2°. *Les espaces parcourus sont proportionnels aux carrés des temps employés à les parcourir.* C'est-à-dire que si l'on représente par 1 le chemin parcouru en 1 seconde, les chemins parcourus en 2, 3, 4, 5... secondes, seront représentés par 4, 9, 16, 25..., carrés des premiers nombres.

Ces deux lois se démontrent par le calcul; en traitant de la pesanteur, on verra comment on les démontre par l'expérience (54).

35. **Proportionnalité des forces aux accélérations, quantité de mouvement.** — On démontre en mécanique rationnelle que lorsque plusieurs forces constantes F, F', F''....., agissent successivement sur un même corps, elles lui impriment, en temps égaux, des accélérations de vitesse G, G', G''. ... proportionnelles à ces forces; c'est-à-dire qu'on a $\frac{F}{F'} = \frac{G}{G'}$, $\frac{F}{F''} = \frac{G}{G''}$.....

Ce principe permet donc de mesurer les forces par les accélérations de vitesse qu'elles communiquent aux mobiles, les forces étant estimées en kilogrammes et les vitesses en mètres; de plus, comme des égalités ci-dessus, on tire $\frac{F}{G} = \frac{F'}{G'} = \frac{F''}{G''}$..... on voit que, pour un même corps, le rapport entre la force qui le sollicite et l'accélération de vitesse qu'elle lui communique est constant, quelle que soit la force.

C'est ce rapport constant que les mécaniciens ont adopté pour représenter la *masse* des corps (4), et ils disent que deux corps sont de même masse quand, sollicités par des forces égales, ils prennent, dans le même temps, des accélérations de vitesse égales.

En représentant par M et m les masses de deux corps, par F et f les forces qui agissent sur eux, par V et v les vitesses qu'elles leur communiquent, on a donc $\frac{F}{V} = M$, $\frac{f}{v} = m$; ou $F = MV$, et $f = mv$. Divisant ces deux égalités membre à membre,

on a $$\frac{F}{f} = \frac{MV}{mv}.$$

Le produit MV de la masse d'un corps par la vitesse dont il est animé, a reçu le nom de *quantité de mouvement* de ce corps. On peut donc énoncer la dernière égalité ci-dessus en disant que deux forces quelconques sont entre elles comme les quantités de mouvement qu'elles impriment à deux masses différentes. Par conséquent, si l'on prend pour unité de force celle qui imprimerait à l'unité de masse l'unité de vitesse, on voit que les forces peuvent se mesurer par leur quantité de mouvement.

Les forces étant proportionnelles à leurs quantités de mouvement, il en résulte que

pour une même force le produit MV est constant; c'est-à-dire que la masse devenant deux, trois fois plus grande, la vitesse est deux, trois fois plus petite. Ce résultat se déduit de la dernière égalité ci-dessus, en y faisant $F = f$, ce qui donne $MV = mv$, ou $\frac{M}{m} = \frac{v}{V}$; c'est-à-dire que les vitesses imprimées par une même force à deux masses inégales sont en raison inverse de ces masses.

Si $V = v$, on a $\frac{F}{f} = \frac{M}{m}$; c'est-à-dire que deux forces sont entre elles comme les masses auxquelles elles impriment des vitesses égales.

Les effets produits par le choc dépendent de la quantité de mouvement du corps choquant; et comme cette quantité est directement proportionnelle à la masse et à la vitesse, il en résulte qu'avec une petite masse un corps peut néanmoins posséder une quantité de mouvement considérable, s'il est animé d'une très-grande vitesse; tel est l'effet de la balle de fusil. De même, avec une faible vitesse, un corps possède encore une quantité de mouvement énorme si sa masse est suffisamment grande; tel est l'effet des marteaux, des pilons, des boeards, des moutons qui servent à enfoncer les pilotis sous l'eau. Enfin, si le corps possède à la fois une grande vitesse et une grande masse, sa quantité de mouvement atteindra une puissance redoutable; de là les ravages produits par le boulet de canon et les accidents terribles des chemins de fer.

Dans les charges de cavalerie, c'est du côté où il y a la plus grande quantité de mouvement qu'est le maximum d'effet. Là, le poids des chevaux, des harnais, des hommes et des armes a son effet utile, à la condition toutefois d'une vitesse plus ou moins grande; car si la vitesse était nulle, il en serait de même de la quantité de mouvement. Aussi, dans ce cas, l'expérience a-t-elle toujours montré que la cavalerie composée des chevaux et des hommes les plus massifs et les plus forts ne peut soutenir de pied ferme le choc de la cavalerie légère.

LIVRE II

PESANTEUR ET ATTRACTION MOLÉCULAIRE.

CHAPITRE PREMIER

EFFETS GÉNÉRAUX DE LA PESANTEUR.

36. **Attraction universelle, ses lois.** — L'*attraction universelle* est une force en vertu de laquelle toutes les parties matérielles des corps tendent sans cesse les unes vers les autres.

On regarde cette force comme une propriété générale inhérente à la matière. Elle agit sur tous les corps, qu'ils soient en repos ou en mouvement. Elle est toujours réciproque entre eux, et s'exerce à toutes les distances ainsi qu'à travers toutes les substances.

L'attraction universelle prend le nom de *gravitation*, lorsqu'elle s'exerce entre les astres; celui de *pesanteur*, quand on considère l'attraction que la terre exerce sur les corps pour les faire tomber; et celui d'*attraction moléculaire*, en parlant de la force qui lie entre elles les molécules des corps.

Les philosophes de l'antiquité, Démocrite, Épicure, avaient adopté l'hypothèse d'une tendance de la matière vers des centres communs sur la terre et sur les astres. Képler admit une attraction réciproque entre le soleil, la terre et les autres planètes. Bacon, Galilée, Hook, ont également reconnu une attraction universelle; mais c'est Newton qui, le premier, a déduit des lois de Képler sur le mouvement des planètes, que la gravitation est une loi générale de la nature, et que *les corps s'attirent entre eux en raison composée des masses et en raison inverse du carré des distances.*

Depuis Newton, l'attraction de la matière par la matière a été démontrée experimentalement par Cavendish, célèbre chimiste et physicien anglais, mort au commencement de ce siècle. Ce savant, au moyen d'un appareil qu'on nomme *balance de Cavendish*, et

qui n'est autre chose qu'une balance de torsion (70), est parvenu à rendre sensible l'attraction exercée par une grosse boule de plomb sur une petite sphère de cuivre.

37. **Pesanteur.** — La pesanteur est la force en vertu de laquelle les corps abandonnés à eux-mêmes *tombent*, c'est-à-dire se dirigent vers le centre de la terre. Cette force, qui n'est qu'un cas particulier de l'attraction universelle, est due à l'attraction réciproque qui s'exerce entre la masse de la terre et celle des corps.

Ainsi que la gravitation universelle, la pesanteur agit en raison inverse du carré de la distance et proportionnellement à la masse. Elle s'exerce sur tous les corps, dans quelques conditions qu'ils se trouvent; et si quelques-uns, comme les nuages, la fumée, semblent s'y soustraire en s'élevant dans l'atmosphère, on verra bientôt (160) qu'il faut en rapporter la cause à la pesanteur même.

38. **Direction de la pesanteur, verticale et horizontale.** — Lorsque les molécules d'une sphère matérielle agissent par attraction, en raison inverse du carré de la distance, sur une molécule située hors de cette sphère, on démontre, en mécanique rationnelle, que la résultante de toutes ces attractions est la même que si toutes les molécules de la sphère étaient réunies à son centre. Il résulte de ce principe qu'en chaque point de la surface du globe, l'attraction de la terre est dirigée vers son centre. Toutefois, l'aplatissement de la terre aux pôles, la non-homogénéité de ses parties, les inégalités de sa surface, sont autant de causes qui peuvent changer la direction de la pesanteur, mais d'une quantité peu sensible.

On nomme *verticale* la direction de la pesanteur, c'est-à-dire la ligne droite que suivent les corps en tombant. Sur tous les points du globe, les verticales convergeant sensiblement vers le centre, leur direction change d'un lieu à un autre; mais, pour des points peu distants les uns des autres, tels que les molécules d'un même corps ou de corps voisins, on regarde les verticales comme rigoureusement parallèles; car le rayon moyen de la terre, c'est-à-dire celui qui correspond à la latitude de 45°, étant de 6 367 400 mètres, les angles de ces verticales entre elles sont insensibles. Toutefois, pour deux points éloignés l'un de l'autre, l'angle n'est pas négligeable. Il est d'environ 2° 12′ entre les verticales de Paris et de Dunkerque, et de 7° 28′ entre celles de Paris et de Barcelone. Quant à la détermination de l'angle ainsi formé par les verticales de deux lieux différents, elle se fait en observant, de chacun de ces lieux, une même étoile, et mesurant l'angle que le rayon visuel fait avec

la verticale. La différence des angles trouvés est l'angle des deux verticales entre elles.

On entend par *ligne horizontale, plan horizontal,* une ligne, un plan perpendiculaires à la verticale.

39. **Fil à plomb.** — La verticale en un lieu quelconque se détermine par le *fil à plomb*. On nomme ainsi un fil auquel est suspendue une petite balle de plomb (fig. 8). Ce fil, étant fixé par son extrémité supérieure et abandonné à lui-même, prend naturellement la direction de la verticale; car on verra bientôt qu'un corps qui n'a qu'un point d'appui, ne peut être en équilibre qu'autant que son centre de gravité et le point d'appui sont situés sur une même verticale (43).

Fig. 8.

Le fil à plomb ne peut indiquer si la direction de la pesanteur, en un lieu, est constante. En effet, si l'on observait que le fil à plomb d'abord parallèle au mur d'un édifice, par exemple, a cessé de l'être, on ne saurait dire si c'est la pesanteur qui a changé de direction ou si c'est le mur qui s'est incliné. Mais en traitant des propriétés des liquides, nous verrons que leur surface ne peut demeurer horizontale, ou *être de niveau*, qu'autant qu'elle est perpendiculaire à la direction de la pesanteur (87). Par conséquent, si celle-ci changeait, il en serait de même du niveau des mers. La stabilité de ce niveau est donc une preuve que la direction de la pesanteur est constante.

Toutefois, près d'une grande masse de matière, comme une montagne, le fil à plomb est dévié; Lacondamine et Bouguer ont constaté que la montagne le Chimboraço imprime au fil à plomb une déviation de 7″,5.

CHAPITRE II

DENSITÉ, POIDS, CENTRE DE GRAVITÉ, BALANCES.

40. **Densité absolue et densité relative.** — On nomme *densité* d'un corps sa masse sous l'unité de volume (4). On ne peut dire quelle est la *densité absolue*, c'est-à-dire la quantité réelle de matière qu'un corps renferme; on ne peut déterminer que sa *densité*

relative, c'est-à-dire la quantité de matière qu'il contient, à volume égal, par rapport à un autre corps pris pour terme de comparaison. Ce corps, pour les solides et les liquides, est l'eau distillée et prise à 4° au-dessus de 0; pour les gaz, c'est l'air. Par conséquent, quand on dit que la densité du zinc est 7, cela signifie que, sous le même volume, ce métal contient 7 fois plus de matière que l'eau.

En représentant par V le volume d'un corps, par M sa masse absolue et par D sa quantité de matière sous l'unité de volume, c'est-à-dire sa densité absolue, il est évident que la quantité de matière contenue dans le volume V est V fois D; d'où $M = VD$. De cette égalité, on tire $D = \frac{M}{V}$; d'où l'on peut dire encore que la *densité d'un corps est le rapport de sa masse à son volume.*

41. **Poids.** — On distingue, dans tout corps, le *poids absolu*, le *poids relatif* et le *poids spécifique*.

Le *poids absolu* d'un corps est la pression qu'il exerce sur l'obstacle qui l'empêche de tomber. Cette pression n'est autre chose que la résultante des actions de la pesanteur sur chacune des molécules du corps; d'où il résulte qu'elle est d'autant plus grande que le corps contient plus de matière: ce qu'on exprime en disant que le poids d'un corps est proportionnel à sa masse.

Le *poids relatif* d'un corps est celui qui se détermine au moyen de la balance; c'est le rapport du poids absolu du corps à un autre poids déterminé qu'on a choisi pour unité. Dans le système métrique, cette unité est le gramme. Ainsi, quand on trouve qu'un corps pèse 58 grammes, 58 est son poids relatif. En adoptant une autre unité, le poids relatif changerait, mais le poids absolu serait le même.

Enfin, le *poids spécifique* d'un corps est le rapport de son poids relatif, sous un certain volume, à celui d'un égal volume d'eau distillée et à 4° au-dessus de 0. Par exemple, si l'on dit que le poids spécifique du zinc est 7, cela exprime qu'à volume égal le zinc pèse 7 fois plus que l'eau distillée.

Le poids des corps, à volume égal, étant proportionnel à leur masse, il en résulte que si un corps contient deux, trois fois plus de matière que l'eau, il doit être deux, trois fois plus pesant; par conséquent, le rapport entre les poids, ou le poids spécifique, doit être le même que le rapport entre les masses, ou la densité relative. C'est pourquoi les expressions *densité relative* et *poids spécifique* sont généralement regardées comme équivalentes. Toutefois, si la pesanteur était détruite, il n'y aurait plus ni poids

absolu ni poids relatif, tandis qu'il y aurait toujours lieu de considérer les densités. Celles-ci ne pourraient se déterminer alors par la balance; mais on a vu (35) que le rapport des masses est le même que le rapport des forces qui imprimeraient à ces masses une même vitesse dans le même temps, ce qui permettrait encore de déterminer les densités.

On a vu précédemment (35) que la masse d'un corps est égale au rapport constant de la force qui le sollicite à l'accélération de vitesse qu'elle lui imprime; si donc on représente par P le poids d'un corps, c'est-à-dire la force qui tend à le faire tomber, par g l'accélération de vitesse que la pesanteur lui imprime, accélération qui peut être prise pour intensité de cette force, enfin par M la masse du corps, on a $\frac{P}{g} = M$, d'où $P = gM$.

Cette formule fait voir que le poids d'un corps est proportionnel à sa masse et à l'intensité de la pesanteur. En y remplaçant M par sa valeur VD (40), on a $P = VDg$. Avec un autre corps dont le poids, la densité et le volume seraient P', V' et D', on aurait de même $P' = V'D'g$. Pour $D = D'$, on a $\frac{P}{P'} = \frac{V}{V'}$ [1], et pour $P = P'$, on a $VD = V'D'$, d'où $\frac{V}{V'} = \frac{D'}{D}$ [2]. De l'égalité [1], on conclut qu'à densité égale, les poids sont proportionnels aux volumes; et de l'égalité [2], qu'à poids égal, les volumes sont en raison inverse des densités.

On verra bientôt les procédés à l'aide desquels on détermine les poids spécifiques des solides et des liquides par rapport à l'eau. Quant aux gaz, leurs poids spécifiques se prennent par rapport à l'air, et exigent, pour être calculés, des notions sur la chaleur qui ne seront données que plus tard.

42. Centre de gravité; sa détermination expérimentale. — Le *centre de gravité* d'un corps est un point par lequel passe constam-

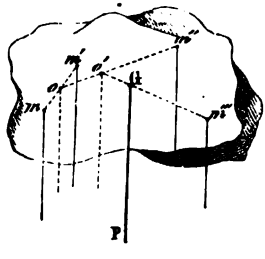


Fig. 9.

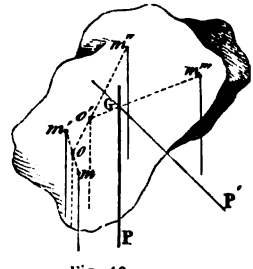


Fig. 10.

ment la résultante des actions de la pesanteur sur les molécules de ce corps, dans toutes les positions qu'il peut prendre.

Tout corps a un centre de gravité unique. En effet, soit une masse quelconque (fig. 9), et m, m', m'', m'''....., ses molécules. Toutes celles-ci étant sollicitées par la pesanteur suivant des directions verticales, il en résulte un système de forces parallèles dont on obtient la résultante en cherchant d'abord celles des forces qui sollicitent deux molécules quelconques, m et m' (27), puis la résultante de la force ainsi obtenue et de celle qui sollicite une troisième molécule m'', et ainsi de suite jusqu'à une résulante finale P, appliquée en G et représentant le poids du corps. Or, si l'on donne au corps une autre position, comme le montre la figure 10, les molécules m, m', m''...., étant encore sollicitées par les mêmes forces que lorsque le corps était dans la position représentée dans la figure 9, la résultante des forces qui sollicitent m et m' continue à passer en o, puis la résultante suivante en o', et ainsi de suite jusqu'à la résultante P, qui passe encore en G, où elle coupe la direction GP', qu'avait la même résultante dans la première position. La même chose ayant lieu dans toutes les positions qu'on donne au corps, c'est le point G, où passe constamment la direction du poids, qui est le centre de gravité.

La recherche du centre de gravité d'un corps quelconque est du domaine de la géométrie; mais, dans plusieurs cas, on peut le déterminer immédiatement. Par exemple, dans une ligne droite homogène, le centre de gravité se trouve au milieu de la droite; dans

Fig. 11.

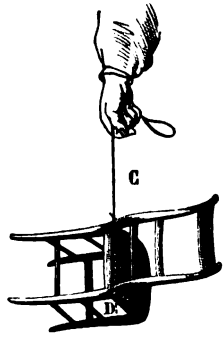


Fig. 12.

un cercle, il est au centre; il en est de même pour une sphère. Dans les cylindres, il est au milieu de l'axe. En statique, on fait voir que,

dans un triangle, le centre de gravité se trouve sur la ligne qui joint un des sommets au milieu du côté opposé, et aux deux tiers de cette ligne à partir du sommet. Dans les pyramides, il est placé sur la droite qui joint le sommet au centre de gravité de la base, et aux trois quarts de cette droite à partir du sommet; il en est de même dans les cônes.

On peut, dans plusieurs cas, déterminer le centre de gravité par l'expérience. Pour cela, on suspend le corps à un cordeau, successivement dans deux positions différentes, comme le montrent les figures 11 et 12; puis on cherche le point où le cordeau CD, dans la seconde position, va couper la direction AB, qu'avait le cordeau dans la première; ce point est le centre de gravité cherché. En effet, dans chaque position, l'équilibre ne pouvant s'établir qu'autant que le centre de gravité vient se placer au-dessous du point d'attache du cordeau et sur sa direction (43), il en résulte que le centre de gravité doit être placé à la fois sur les deux directions du cordeau, et, par conséquent, à leur point de rencontre.

Dans les corps dont la forme et l'homogénéité sont invariables, la position du centre de gravité est constante; dans le cas contraire, la position de ce point change. C'est ce qui arrive dans les animaux, où la position du centre de gravité varie avec les attitudes.

43. **Équilibre des corps pesants.** — L'action de la pesanteur se réduisant à une force unique, verticale, dirigée de haut en bas, et appliquée au centre de gravité, il suffit, pour qu'il y ait équilibre, que cette force soit detruite par la résistance d'un point fixe par lequel elle passe.

Il se présente ici deux cas, suivant que le corps pesant est soutenu par un seul point d'appui ou par plusieurs. Dans le premier cas, le centre de gravité doit coïncider avec le point d'appui, ou se trouver sur la verticale qui passe par ce point. Dans le second, il suffit que la verticale menée par le centre de gravité passe dans l'intérieur de la *base*, c'est-à-dire du polygone qu'on obtient en joignant entre eux les points d'appui.

Dans les tours de Pise et de Bologne, qui sont tellement inclinées à l'horizon qu'elles semblent menacer les passants de leur chute, l'équilibre persiste parce que le centre de gravité se trouve sur une verticale passant dans l'intérieur de la base.

Un homme est d'autant plus ferme sur ses pieds que ceux-ci présentent une base plus grande; car il peut alors donner à ses mouvements plus d'amplitude, sans que la verticale menée par son centre de gravité se trouve en dehors de cette base. S'il se pose

sur un pied, la base diminue; elle diminue encore s'il s'élève sur la pointe du pied. Dans cette position, un très-faible balancement suffit pour que le centre de gravité ne soit plus au-dessus de la base, et pour rompre l'équilibre.

44. Divers états d'équilibre. — Selon la position du centre de gravité par rapport au point d'appui, il se présente trois états d'équilibre : l'état d'*équilibre stable*, celui d'*équilibre instable*, et celui d'*équilibre indifférent*.

L'*équilibre stable* est l'état d'un corps qui, dévié de sa position d'équilibre, y revient de lui-même aussitôt qu'aucun obstacle ne s'y oppose. Cet état se présente toutes les fois qu'un corps est dans une position telle que son centre de gravité est plus bas que dans toute autre position voisine. Si le corps est alors déplacé, son centre de gravité ne peut être que relevé, et comme la pesanteur tend sans cesse à l'abaisser, elle le ramène, après un suite d'oscillations, à sa position première, et l'équilibre se rétablit. Tel est le cas d'un balancier d'horloge, ou celui d'un œuf sur un plan horizontal, lorsque son grand axe est sensiblement parallèle à ce plan.

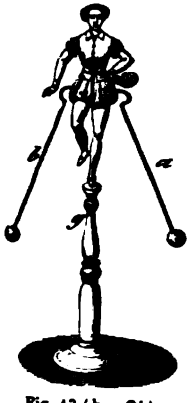


Fig. 13 (b=21).

Comme exemple d'équilibre stable, on construit de petites figures en ivoire (fig. 13), qu'on fait tenir sur un pied en les chargeant de deux boules de plomb placées assez bas pour que, dans toutes les positions, le centre de gravité *g* des boules et de la petite figure se trouve au-dessous du point d'appui.

L'*équilibre instable* est l'état d'un corps qui, dévié de sa position d'équilibre, ne tend qu'à s'en écarter davantage. Cet état se présente toutes les fois qu'un corps est dans une position telle que son centre de gravité est plus haut que dans toute autre position voisine; car, par un déplacement quelconque, le centre de gravité étant abaissé, la pesanteur ne tend qu'à l'abaisser davantage. Tel est le cas d'un œuf reposant sur un plan horizontal de manière que son grand axe soit vertical. C'est aussi celui d'un bâton qu'on fait tenir en équilibre debout sur un doigt.

Enfin, on nomme *équilibre indifférent* celui qui persiste dans toutes les positions que peut prendre un corps. Ce genre d'équilibre se rencontre lorsque, dans les diverses positions du corps, son

centre de gravité n'est ni relevé ni abaissé, ainsi qu'il arrive pour une roue de voiture soutenue par son essieu, ou pour une sphère reposant sur un plan horizontal.

La figure 14 représente trois cônes, A, B, C, placés respective-

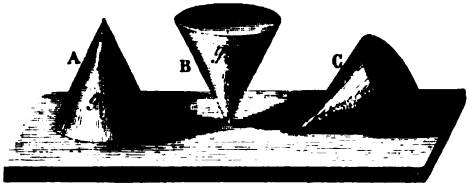


Fig. 14.

ment dans les positions d'équilibre stable, instable et indifférent. Dans tous les trois, la lettre *g* désigne la position du centre de gravité.

45. Leviers. — Avant de faire connaître la théorie des balances, nous rappellerons ici une autre théorie qui appartient au cours de

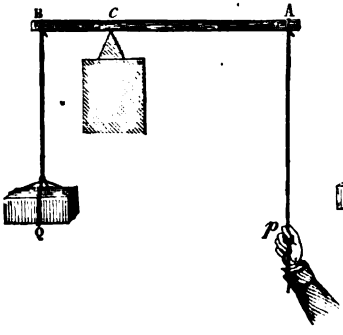


Fig. 15.

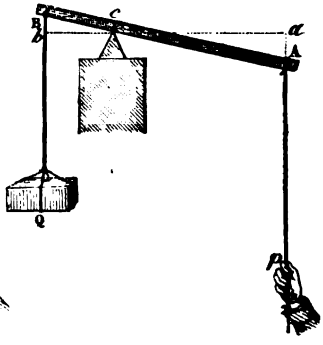


Fig. 16.

mécanique, celle du levier, sans laquelle ce qui a rapport aux balances ne peut être bien compris.

On nomme *levier* toute barre AB (fig. 15), droite ou courbe, s'appuyant sur un point fixe *c*, autour duquel elle est sollicitée à tourner en sens contraire par deux forces parallèles ou concourantes. L'une de ces forces, celle qui agit comme moteur, est la

puissance, l'autre est la *résistance*. D'après la position du point d'appui par rapport aux points d'application de la puissance et de la résistance, on distingue trois genres de leviers : 1° le *levier du premier genre*, quand le point d'appui est placé entre la puissance et la résistance ; 2° le *levier du second genre*, lorsque la résistance est entre le point d'appui et la puissance ; 3° le *levier du troisième genre*, quand la puissance se trouve entre le point d'appui et la résistance.

Dans les trois genres de leviers, les distances respectives de la puissance et de la résistance au point d'appui se nomment *bras de levier*. Si le levier est droit et perpendiculaire aux directions de ces deux forces, comme dans la figure 15, les deux portions Ac et Bc du levier sont elles-mêmes les bras du levier ; mais si le levier est incliné par rapport à la direction des forces (fig. 16), les bras de levier sont les perpendiculaires *ca* et *cb*, abaissées du point fixe sur ces directions.

Cela posé, on démontre en mécanique qu'une force qui tend à faire tourner un levier autour de son point d'appui, produit d'autant plus d'effet que sa direction passe plus loin de ce point d'appui, ou, ce qui est la même chose, qu'elle agit sur un plus grand bras de levier. Il découle de là que lorsque la puissance et la résistance ont même intensité, et agissent sur des bras de levier égaux, elles produisent le même effet, mais en sens contraire, et dès lors se font équilibre ; mais si elles agissent sur des bras de levier inégaux, si, par exemple, le bras de levier de la puissance est deux, trois fois plus grand que celui de la résistance, il est évident que les effets ne seront égaux qu'à la condition que la puissance soit deux, trois fois plus petite que la résistance, ce qu'on exprime en disant que *pour que deux forces se fassent équilibre, à l'aide d'un levier, leurs intensités doivent être en raison inverse des bras de levier auxquels elles sont appliquées*.

Ces notions données, passons à la théorie des balances.

46. **Balances.** — On nomme *balances* des appareils qui servent à déterminer le poids relatif des corps. On en construit de plusieurs sortes.

La balance ordinaire (fig. 17) consiste en un levier du premier genre, nommé *fléau*, dont le point d'appui est au milieu ; aux deux extrémités du fléau sont suspendus des *bassins* soutenus par des cordons ou des chaînes, et destinés à recevoir, l'un, les objets à peser, l'autre, des poids. Le fléau est traversé, en son milieu, par un prisme d'acier *a* qu'on nomme *couteau*, et qui repose,

par un tranchant aigu, sur une *chape* d'agate ou d'acier poli, pour diminuer les frottements. Enfin, au fléau est fixée une aiguille qui oscille devant un arc gradué *n*; quand le fléau est bien horizontal, l'aiguille correspond au zéro de la graduation.

Comme on a vu ci-dessus (45) que deux forces égales ne peuvent se faire équilibre, à l'aide d'un levier du premier genre,

Fig. 17.

qu'autant qu'elles agissent sur des bras de levier égaux, il importe que la longueur des bras de levier *a*A et *a*B ne change pas pendant la pesée. Pour obtenir ce résultat, on a soin de suspendre les plateaux à un crochet dont la partie courbe est à arête vive, et on fait reposer ce crochet sur une arête semblable qui termine les deux bras du fléau. De la sorte les bassins ne sont supportés que par un seul point, et ce point reste toujours le même malgré les oscillations de la balance. C'est ce genre de suspension qui est représenté dans la figure ci-dessus.

47. **Conditions auxquelles doit satisfaire une balance.** — Une balance, pour donner des pesées exactes, doit satisfaire aux conditions suivantes :

1° *Les deux bras du fléau doivent être rigoureusement égaux*, sinon, d'après la théorie du levier, il faudrait, dans les bassins, des poids inégaux pour se faire équilibre. Pour reconnaître si les bras du fléau sont égaux, on place des poids dans les deux plateaux, de manière que le fléau prenne une position horizontale. Transposant ensuite les poids respectivement d'un bassin dans l'autre, le fléau restera horizontal si les bras sont égaux, car, dans ce cas, les poids le sont aussi; sinon il inclinera du côté du bras le plus long.

2° *La balance doit demeurer en équilibre lorsque les bassins sont vides;* car autrement on devrait placer des poids inégaux dans les deux bassins pour obtenir l'équilibre. Toutefois, il ne faudrait pas croire que les bras sont égaux par cela seul que, les bassins étant vides, le fléau demeure horizontal. En effet, il suffirait de donner au bras le plus long un bassin plus léger pour qu'il en fût ainsi.

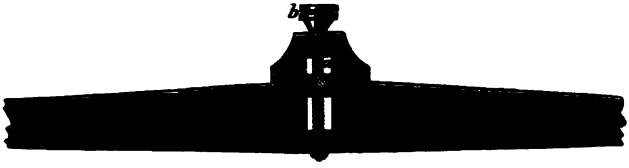


Fig. 18.

3° *Le fléau étant horizontal, son centre de gravité doit se trouver sur la verticale qui passe par l'arête du couteau et un peu au-dessous de cette arête*, sinon le fléau ne pourrait prendre un état d'équilibre stable (44). En effet, si le centre de gravité atteignait l'arête du couteau, la balance serait à l'état d'équilibre indifférent; s'il dépassait cette position, l'équilibre serait instable, et on dit alors que la balance est *folle*.

Dans les cours de physique, on rend sensibles les trois cas que présente la position du centre de gravité par rapport au couteau, au moyen d'un fléau dont le couteau peut s'élever ou s'abaisser à l'aide d'une vis *a*, qui tourne dans un écrou pratiqué dans la masse même du couteau (fig. 18). Lorsque le couteau est au point le plus haut de la coulisse *c*, dans laquelle il monte et descend, le centre de gravité est au-dessous de son arête; le fléau est en équilibre stable et oscille librement sur les points d'appui qui soutiennent le couteau. Mais lorsqu'en tournant la vis, on abaisse lentement le couteau, il arrive un moment où son arête coïncide avec le centre

de gravité du fléau; alors celui-ci n'oscille plus et reste en équilibre dans toutes les positions qu'on lui donne. Enfin, en continuant à abaisser le couteau, le centre de gravité passe au-dessus des points d'appui, et dès lors la balance est folle.

48. **Conditions de sensibilité.** — On dit qu'une balance est *sensible* lorsque le fléau oscille facilement pour une très-petite différence de poids dans les deux plateaux; s'il n'oscille que pour une différence de poids un peu considérable, la balance est dite *paresseuse*.

Plusieurs causes concourent à la sensibilité d'une balance : en général, cette sensibilité est d'autant plus grande, 1° que le frot-

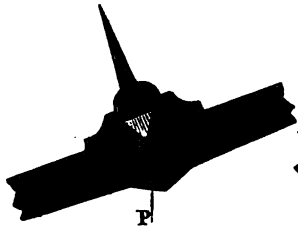


Fig. 19.

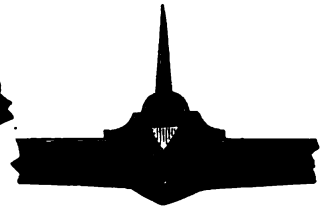


Fig. 20.

tement du couteau sur ses points d'appui est plus faible; c'est pour cela qu'on le fait reposer sur deux supports en agate ou en acier bien trempé; 2° que le fléau est plus léger et les bassins moins chargés, car alors le frottement est moindre; 3° que les bras du fléau sont plus longs, parce que la différence de poids qui produit l'oscillation agit sur un plus grand bras de levier; 4° que l'aiguille qui marque les oscillations est plus longue, parce que celles-ci sont plus apparentes; 5° que le centre de gravité du fléau, tout en restant au-dessous du couteau, est plus rapproché de son arête.

Pour se rendre compte de cette dernière condition, il suffit de considérer la figure 20, dans laquelle le centre de gravité *g* est notablement au-dessous de l'arête *n* du couteau. Dans ce cas, lorsque le fléau oscille, comme le montre la figure 19, la force appliquée en *g*, passant loin du point d'appui *n*, elle a, d'après ce qui a été dit plus haut sur le levier (45), un effet d'autant plus puissant, pour s'opposer aux oscillations, que la distance *on* est plus grande. Au contraire, si la distance *gn* est petite, il en est de même de *on*, et la force P agissant sur un plus petit bras de levier,

ne présente qu'une faible résistance aux oscillations du fléau.

Il est encore une condition qui contribue à la sensibilité des balances, c'est la position, par rapport au couteau central, des deux couteaux extrêmes qui portent les plateaux. La droite qui joint les arêtes des couteaux extrêmes doit rencontrer l'arête du couteau central, comme le montre la figure 23 ci-après. En effet, les poids dont les plateaux sont chargés, et qui sont appliqués aux couteaux *m* et *n*, représentant deux forces égales et parallèles, la résultante de ces forces est appliquée au point *o*, milieu de *mn* (27). Cela posé, si l'arête du couteau central est au-dessus de la droite *mn* (fig. 21), il en sera de même, en général, du centre de gravité du fléau, puisque ce point doit toujours être très-rapproché de l'arête du couteau. Par suite, la force appliquée en *g* se composant avec celle appliquée en *o*, la force unique qui en résulte a son point d'application entre *o* et *g*; c'est-à-dire au-dessous du point *g*, et par conséquent plus loin du point d'appui; d'où il découle qu'elle tend davantage à s'opposer aux oscillations du fléau. Si la ligne *mn* passe au-dessus de l'arrête du couteau, comme dans la figure 22, les deux forces appliquées en *o* et en *g* se réduisent encore à une force unique dont le point d'application est situé entre *o* et *g*. Mais, dans ce cas, le point d'application de cette résultante pouvant passer au-dessus du point d'appui, la balance tend à devenir folle. Enfin, si les trois arêtes des couteaux sont en ligne droite (fig. 23), la résultante des forces appliquées en *o* et en *g* passant entre ces deux points, son point d'application est plus près du couteau que le point *g*, et dès lors la balance oscille plus facilement : cette dernière disposition est donc la meilleure.

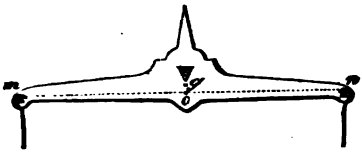


Fig. 21

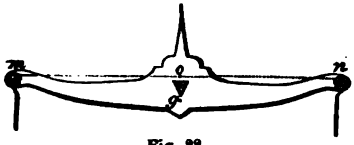


Fig. 22.

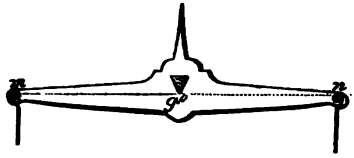


Fig. 23.

* 49. **Balance de précision.** — La balance représentée dans la

figure 17 est celle employée dans le commerce, auquel elle offre une précision suffisante; mais en physique, en chimie surtout, pour les analyses, on doit faire usage de balances plus précises.

La figure 24 montre une balance de précision construite par M. Deleuil, et tellement sensible qu'elle incline pour un excès de

Fig. 24.

poids d'un milligramme, même lorsqu'elle est chargée d'un kilogramme dans chaque plateau.

Afin de garantir une pareille balance des agitations de l'air, on la recouvre d'une cage de verre qui la préserve en même temps de la poussière et de l'humidité. La face antérieure de la cage est à coulisse et se soulève légèrement pour introduire les objets à peser.

Pour ne pas fatiguer le tranchant du couteau lorsque la balance ne fonctionne pas, on soulève le fléau au moyen d'une pièce mobile qu'on nomme *fourchette*. Pour en faire comprendre le mécanisme, commençons par observer que la pièce AA est fixe, ainsi que les deux tiges verticales qui sont à ses extrémités. Deux pièces DD sont adaptées au fléau et destinées à recevoir la poussée de la

fourchette. Celle-ci consiste en une barre *aa*, à laquelle sont fixées deux traverses horizontales EE, qui montent avec la fourchette et viennent soulever les deux pièces DD, et avec elles le fléau. La fourchette est guidée dans son mouvement par les tiges AA qui la traversent à frottement doux à ses extrémités. Quant au mouvement de la fourchette, il s'obtient au moyen d'un bouton O, qu'on fait marcher avec la main, et qui transmet son mouvement à une vis placée dans l'intérieur de la colonne. C'est cette vis qui, en tournant, soulève la fourchette, et avec elle les deux pièces EE, qui, elles-mêmes, soulèvent le fléau BB.

On juge de l'horizontalité du fléau au moyen d'une longue aiguille qui lui est fixée par sa partie supérieure et dont l'extrémité inférieure correspond à un arc de cercle gradué, qui est placé sur le pied de la balance.

Enfin, un bouton à vis C, placé sur le fléau, sert à augmenter la sensibilité de la balance; en remontant cette vis, on relève le centre de gravité du fléau, ce qui, ainsi qu'on l'a vu ci-dessus, (48), rend la balance plus sensible.

* 50. **Balances à suspension inférieure.** — Dans les balances décrites ci-dessus, les points de suspension sont au-dessus des bassins. Or, on fabrique depuis quelques années, et l'usage s'en répand de plus en plus dans le commerce, des balances dont les points de suspension sont en dessous. Ces balances, représentées dans la figure 25, sont d'une forme gracieuse; elles n'encombrent pas les comptoirs comme les balances à colonne, et sont surtout commodes pour peser les objets volumineux, ce qu'on ne peut faire sans obstacle avec les balances ordinaires, à cause des chaînes ou des cordons qui soutiennent les bassins. Toutefois, les balances à suspension inférieure ne sont pas des balances de précision, elles ont trop de frottement pour cela, mais elles peuvent donner des pesées à quelques décigrammes près, ce qui est suffisant pour le commerce.

Les premières balances à suspension inférieure ont paru sous le nom de *balances anglaises*, et aussi sous celui de *balances de Roberval*, parce qu'elles étaient, en effet, une application d'un principe sur les leviers donné par ce géomètre, professeur de mathématiques à Paris, dans le XVIIe siècle. La balance que nous allons décrire (fig. 25 et 26) est une combinaison de la balance de Roberval et de celle de Quintenz, due à M. Béranger, fabricant à Lyon. Ce constructeur s'est attaché, 1° à ce que le mouvement des bassins ait lieu exactement en ligne droite; 2° à ce que l'état d'équilibre

de la balance soit indépendant de la position de la charge dans les bassins, condition qui existe théoriquement dans la balance de Roberval, mais qui n'a pas lieu rigoureusement dans la pratique à cause des frottements.

Le mécanisme adopté par M. Béranger se compose, pour chaque

Fig. 25.

bassin, de trois leviers AB, EF et DC (fig. 26). Le levier DC, qui porte le bassin P, s'abaisse ou se relève en même temps de quantités égales à ses deux bouts, quand l'extrémité B descend ou remonte, comme il est facile de s'en rendre compte à l'inspection de la figure. Ce levier DC se meut donc parallèlement à lui-même, et par suite la tige *a* va et vient exactement dans le sens de la ver-

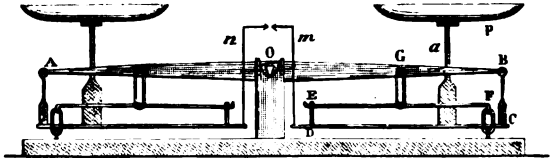


Fig. 26.

ticale. Quant à la position de la charge dans les plateaux, elle n'a pas la même influence que dans la balance de Roberval, d'apres la combinaison des trois leviers. Cependant, dans toute balance, il est préférable de placer la charge au milieu des bassins. Deux tringles recourbées *m* et *n*, fixées au levier horizontal DC, montent et descendent avec lui, et se trouvent en regard l'une de l'autre quand la balance est en équilibre.

51. **Méthode des doubles pesées.** — On doit à Borda, physicien français, mort à Paris, en 1799, un procédé qui permet d'obtenir des pesées exactes avec une balance dont les bras sont inégaux. Pour cela, on place le corps dont on veut connaître le poids dans un des plateaux, et on lui fait équilibre, dans l'autre, avec de la grenaille de plomb ou du sable, puis on enlève du premier plateau le corps à peser, et on le remplace par des grammes et des subdivisions de grammes jusqu'à ce que l'équilibre se rétablisse. Le poids obtenu ainsi est exactement celui du corps; car, dans cette double pesée, le corps et les grammes agissent tour à tour sur le même bras du fléau pour faire équilibre à la même résistance.

CHAPITRE III

LOIS DE LA CHUTE DES CORPS, INTENSITÉ DE LA PESANTEUR, PENDULE.

52. **Lois de la chute des corps.** — En négligeant la résistance de l'air, c'est-à-dire en supposant que les corps tombent dans le vide, la chute des corps présente les trois lois suivantes :

1re LOI. — *Tous les corps, dans le vide, tombent également vite.* Cette loi se démontre par l'expérience au moyen d'un tube de verre de deux mètres de longueur environ, fermé à l'une de ses extrémités et terminé, à l'autre, par un robinet de cuivre. On y introduit des corps de densités différentes, par exemple, du plomb, du liége, du papier, une barbe de plume; puis on fait le vide avec la machine pneumatique. Retournant ensuite le tube brusquement, on voit tous les corps qu'on y a introduits tomber également vite (fig. 27). Mais si, après avoir fait rentrer un peu d'air, on renverse de nouveau le tube, on remarque un faible retard pour les corps les plus légers. Enfin, ce retard devient très-sensible lorsqu'on a laissé rentrer tout à fait l'air. On conclut de là que si, dans les conditions ordinaires, les corps tombent inégalement vite, cela provient uniquement de la résistance de l'air, et non de ce que la pesanteur s'exerce avec plus d'intensité sur certaines substances que sur d'autres. Un corps qui a deux fois plus de masse qu'un autre est bien, en réalité, attiré vers la terre par une force double; mais cette force double devant mettre en mouvement une quantité de

matière double, on a vu (35) qu'elle ne peut lui donner que le même degré de vitesse que reçoit l'autre corps d'une force deux fois plus petite.

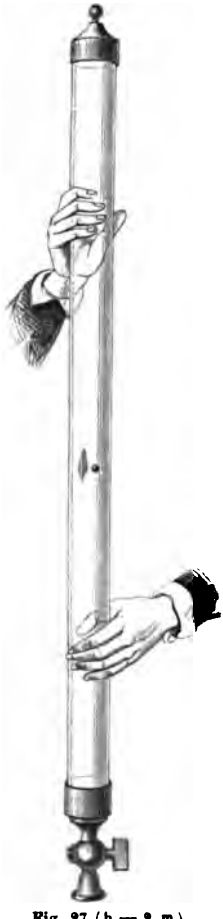


Fig. 27 (h = 2 m).

La résistance que l'air oppose à la chute des corps est surtout sensible pour les liquides. Dans l'air, ils se divisent et tombent en gouttelettes; dans le vide, ils tombent, comme ferait une masse solide, sans se diviser. Ce phénomène se démontre avec le *marteau d'eau*. On nomme ainsi un tube de verre un peu gros, de 30 à 40 centimètres de long, rempli d'eau à moitié et fermé à la lampe après qu'on en a chassé l'air par l'ébullition. Lorsqu'on retourne ce tube brusquement, l'eau, en tombant, vient frapper l'extrémité inférieure en rendant un son sec, comme le ferait le choc de deux corps solides.

2e LOI. — *Les espaces parcourus par un corps qui, partant de l'état de repos, tombe dans le vide, sont proportionnels aux carrés des temps pendant lesquels ils ont été parcourus.* En d'autres termes, dans des temps représentés par 1, 2, 3, 4... les espaces parcourus le sont respectivement par 1, 4, 9, 16...

3e LOI. — *La vitesse acquise par un corps qui tombe dans le vide, est proportionnelle au temps pendant lequel il est tombé.* C'est-à-dire qu'au bout d'un temps deux, trois, quatre fois plus grand, la vitesse acquise est elle-même deux, trois, quatre fois plus grande.

Conséquence. — Puisque d'après la deuxième loi, l'espace parcouru dans la première seconde étant 1, les espaces parcourus dans 2, 3, 4, 5... secondes sont 4, 9, 16, 25..., il en résulte que l'espace parcouru dans la deuxième seconde, est 4 moins 1, ou 3; dans la troisième seconde, il est 9 moins 4, ou 5; dans la quatrième, 16 moins 9,

ou 7, et ainsi de suite; c'est-à-dire que les espaces parcourus successivement dans la première, la deuxième, la troisième, la quatrième... seconde, sont entre eux comme la suite naturelle des nombres impairs 1, 3, 5, 7... On conclut de là que les espaces parcourus augmentent de quantités égales en temps égaux, ce qui est conforme à la définition donnée plus haut du mouvement uniformément accéléré (33).

Les lois de la chute des corps ne sont vraies que dans le vide et pour des hauteurs de chute peu considérables. Dans l'air, elles sont modifiées par la résistance que rencontrent les corps; de plus, on verra bientôt qu'à des hauteurs inégales dans l'atmosphère, l'intensité de la pesanteur n'est pas rigoureusement la même (56).

C'est Galilée qui, à la fin du XVIe siècle, découvrit les lois de la pesanteur, et les fit connaître dans ses cours, à l'université de Pise, où il professait les mathématiques.

53. **Plan incliné.** — Plusieurs appareils ont été imaginés pour démontrer les lois de la chute des corps; ce sont : le *plan incliné*, la *machine d'Atwood* et l'*appareil à cylindre tournant* de M. Morin. Dans les deux premiers, le mouvement est assez lent pour que la résistance de l'air puisse être négligée.

On appelle *plan incliné* tout plan qui fait avec un plan horizontal un angle moindre qu'un droit. Plus cet angle est aigu, plus est faible la vitesse d'un corps qui descend le long d'un plan incliné. En effet, représentons par AB (fig. 28) la section d'un plan incliné, par AC celle d'un plan horizontal, et par BC une perpendiculaire abaissée d'un point B du plan incliné sur le plan horizontal. Un corps quelconque M s'appuyant sur le plan incliné, son poids P pourra être décomposé en deux forces Q et F, l'une perpendiculaire, l'autre parallèle au plan incliné.

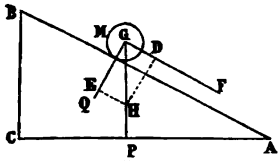


Fig. 28.

La première sera détruite par la résistance du plan, et la force F agira seule sur la masse M pour la faire descendre. Pour calculer la valeur de F, on porte sur GP une longueur GH qui représente le poids P, et on achève le parallélogramme DGEH (29); la force F est alors représentée par DG. Or, les triangles DGH et ABC sont semblables, comme ayant les angles égaux, ce qui donne

$$\frac{DG}{GH} = \frac{BC}{AB}, \text{ ou } \frac{F}{P} = \frac{BC}{BA}.$$

De cette dernière égalité, on conclut que la force F est d'autant plus petite par rapport à P que la *hauteur* BC du plan incliné est plus petite par rapport à sa *longueur* AB. On peut donc rendre la force F aussi petite qu'on le veut, et ralentir le mouvement du mobile M de manière à pouvoir compter, sur le plan incliné, les chemins parcourus en une, deux, trois... secondes; et cela sans que les lois du mouvement

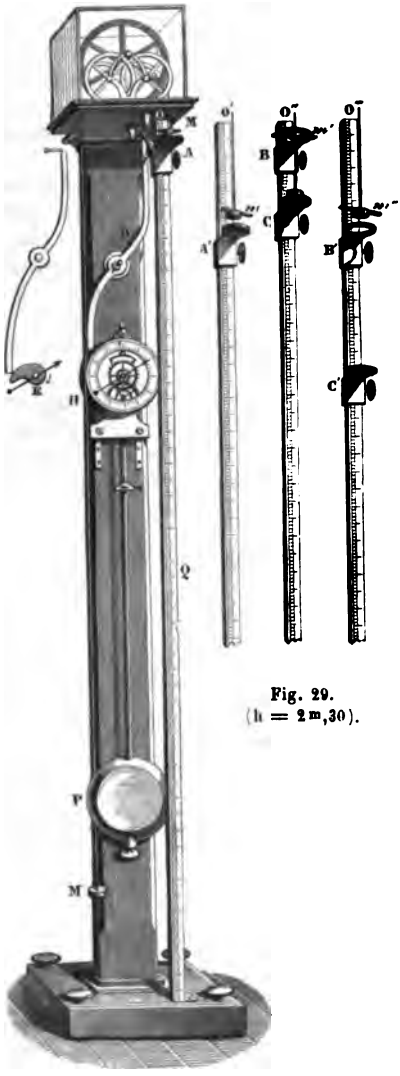


Fig. 29.
($h = 2^m,30$).

soient changées, puisque la force F est continue et constante. C'est en opérant ainsi que Galilée a découvert que les espaces parcourus croissent comme les carrés des temps.

54. **Machine d'Atwood.** — Les lois de la chute des corps se démontrent encore au moyen de la *machine d'Atwood*, ainsi nommée du nom de son inventeur, professeur de chimie à Cambridge, à la fin du siècle dernier. Cette machine se compose d'une colonne de bois (fig. 29) de $2^m,30$ environ de hauteur. A son sommet est une cage de verre sous laquelle est placée une poulie de cuivre; sur celle-ci s'enroule un fil de soie assez fin pour que son poids puisse être négligé, et soutenant, à ses deux bouts, deux poids égaux M et M'. L'axe de la poulie, au lieu de reposer sur deux coussinets fixes, s'appuie sur les jantes croisées de quatre roues mobiles. Par cette disposition, l'axe de la poulie transmettant son mouvement aux quatre roues, au lieu d'un frot-

tement de glissement, il se produit un frottement de roulement, qui est beaucoup plus doux.

Sur la colonne est fixé un mouvement d'horlogerie H, que règle un pendule à secondes P, au moyen d'un échappement à ancre. Ce dernier est représenté sur le cadran, au-dessus de la roue de rencontre qui en occupe le centre. Cet échappement oscille avec le pendule, et, en inclinant tantôt à droite, tantôt à gauche, il laisse passer, à chaque oscillation, une dent de la roue de rencontre. L'axe de celle-ci porte, à l'extrémité antérieure, une aiguille qui marque les secondes, et à l'extrémité postérieure, derrière le cadran, un excentrique qui est figuré en E, sur la gauche de la colonne. Cet excentrique, qui tourne en même temps que l'aiguille, appuie sur un levier D, et, en le faisant avancer, fait basculer un plateau *t* que soutenait ce levier, et qui lui-même est destiné à supporter la masse M.

Enfin, parallèlement à la colonne est une échelle de bois Q, divisée en centimètres et destinée à mesurer les espaces parcourus par le corps qui tombe. Sur cette échelle sont deux *curseurs*, c'est-à-dire deux pièces mobiles, qui, à l'aide de vis de pression, peuvent se placer à telle hauteur qu'on veut. Ces curseurs sont représentés dans différentes positions, sur la droite de la machine, en A, A', B, C, B' et C'. L'un des deux, qui a la forme d'un disque plein, est destiné à arrêter la masse M; l'autre, qui est annulaire, se laisse traverser par cette masse, mais sert à arrêter un petit poids additionnel qu'on pose sur elle, et qui consiste en une lame de laiton plus longue que le diamètre du curseur annulaire.

La machine d'Atwood donne le moyen de ralentir la vitesse de la chute et de faire succéder, à volonté, un mouvement uniforme à un mouvement accéléré.

Pour apprécier comment cette machine peut ralentir le mouvement, supposons que la petite plaque de laiton m, qui, dans notre dessin, est représentée en m, en m' et en m'', tombe seule, et représentons par g sa vitesse au bout d'une seconde; d'où sa quantité de mouvement sera mg (35). Si l'on place cette plaque m sur la masse M, elle ne pourra plus tomber qu'en communiquant une partie de sa vitesse aux deux masses M et M'. En effet, les deux masses M et M' se faisant équilibre, la pesanteur est sans effet sur elles. Par conséquent, c'est la même force qui faisait tomber le poids m, quand il était seul, qui maintenant va mouvoir ce poids et les deux masses M et M'. La quantité de mouvement sera donc la même (35). Or, si l'on représente par x la vitesse au bout d'une seconde, la quantité de mouvement sera $(m + 2M)\,x$; en l'égalant à celle que prend le poids m lorsqu'il tombe seul, on a $(m + 2M)\,x = gm$; d'où $x = \frac{gm}{m + 2M}$. Si l'on suppose, par exemple, que les masses M et M' soient chacune

16, la masse m étant 1, on trouve $x = \frac{g}{33}$; c'est-à-dire que la vitesse sera 33 fois plus petite que si le corps tombait librement dans l'atmosphère; ce qui est suffisant pour permettre de suivre le corps dans sa chute et pour rendre la résistance de l'air à peine sensible.

Les diverses pièces de la machine étant connues, passons à l'expérience, et proposons-nous d'abord de démontrer que les espaces parcourus croissent comme les carrés des temps. Pour cela, le pendule P étant arrêté et l'aiguille du cadran hors du zéro, on place le poids additionnel m sur la masse M, et on pose celle-ci, ainsi chargée, sur le plateau t, maintenu horizontalement par l'extrémité du levier D, et correspondant au zéro de l'échelle. Ne faisant alors usage que du curseur plein, on le place, par tâtonnement, à une distance du zéro de l'échelle telle que les deux masses m et M mettent une seconde à tomber de O en A, chute qui commence au moment où, le pendule ayant été mis en oscillation, l'aiguille arrive au zéro du cadran; car, à ce point, le levier D est chassé par l'excentrique et le plateau t bascule.

Admettons qu'on ait ainsi trouvé que la hauteur de chute, en une seconde, est 7. Recommençant alors l'expérience de la même manière, mais en abaissant le curseur à une distance O'A' quatre fois plus grande que OA, c'est-à-dire à la vingt-huitième division de l'échelle, on observe que cet espace est parcouru juste en 2 secondes par les deux masses m et M. On trouve de même qu'une hauteur neuf fois plus grande, ou de 63 divisions, est parcourue en 3 secondes, et ainsi de suite : la deuxième loi est donc vérifiée.

Pour vérifier la troisième, il faut se rappeler que, dans le mouvement accéléré, on entend par vitesse, en un moment donné, celle du mouvement uniforme qui succède au mouvement accéléré (34). Par conséquent, pour constater suivant quelle loi varie la vitesse d'un corps qui tombe, il suffit de mesurer la vitesse du mouvement uniforme qui succède au mouvement accéléré, successivement après une, deux, trois... secondes de chute.

La substitution du mouvement uniforme au mouvement accéléré s'obtient au moyen du curseur annulaire B. Pour cela, on commence par placer celui-ci à une distance telle que les deux masses m et M réunies mettent à tomber jusqu'à B, une seconde, comme dans la première expérience; puis la masse additionnelle m étant alors arrêtée par le curseur B, et la masse M continuant seule à descendre, on place le curseur plein en C, au-dessous de B, à l'inter-

valle convenable pour que la masse M emploie une seconde à descendre d'un curseur à l'autre. Or, de O'' en B le mouvement est uniformément accéléré, et de B en C il est uniforme, car le petit poids m étant arrêté par le curseur annulaire B, la pesanteur n'agit plus de B en C, et le mouvement ne se continue qu'en vertu de l'inertie. Le nombre des divisions de l'échelle parcourues par la masse M, d'un curseur à l'autre, représente donc la vitesse acquise par les deux masses m et M au bout d'une seconde (34).

Recommençant alors l'expérience, on descend le curseur annulaire B en B', à une distance telle que les deux masses M et m mettent deux secondes à tomber de O''' en B'; puis on fixe le second curseur C' à une distance du premier double de celle qui les séparait d'abord, c'est-à-dire double de BC. Or, les deux masses tombant pendant deux secondes, d'un mouvement uniformément accéléré, du point O''' au point B', on trouve que la masse M parcourt seule, en une seconde, l'intervalle B'C' qui sépare les deux curseurs. La vitesse acquise au bout de deux secondes est donc le double de celle acquise après une seconde. On vérifie de même qu'après trois, quatre secondes, cette vitesse est trois, quatre fois plus grande.

Les lois de la chute des corps se démontrent encore au moyen de l'appareil à indications continues de MM. Morin et Poncelet: mais la description de cet appareil appartient plutôt au cours de mécanique qu'à celui de physique.

35. **Formules relatives à la chute des corps.** — La troisième loi de la chute des corps (32) peut se représenter par la formule $v = gt$; et la seconde par la formule $e = \frac{1}{2} gt^2$. En effet, soient g la vitesse acquise, au bout d'une seconde, par un corps qui tombe dans le vide, et v sa vitesse après t secondes; les vitesses étant proportionnelles aux temps, on a $\frac{v}{g} = \frac{t}{1}$, d'où $v = gt$ [1].

Pour obtenir la formule $e = \frac{1}{2} gt^2$, observons qu'un corps qui tombe, pendant t secondes, d'un mouvement uniformément accéléré, avec une vitesse initiale nulle et une vitesse finale $v = gt$, parcourt nécessairement le même espace que s'il tombait pendant le même temps, d'un mouvement uniforme, avec une vitesse moyenne entre les vitesses 0 et gt, c'est-à-dire avec la vitesse $\frac{1}{2} gt$, puisqu'on sait que la moyenne entre deux quantités n'est autre chose que leur demi-somme. Or, dans ce dernier cas, le mouvement étant uniforme, l'espace parcouru est égal au produit de la vitesse par le temps (32); en représentant par e cet espace, on a donc $e = \frac{1}{2} gt \times t$, ou $e = \frac{1}{2} gt^2$ [2].

Si dans la formule [2], on fait $t = 1$, il vient $e = \frac{1}{2} g$; d'où $g = 2e$. C'est-à-dire que *la vitesse acquise au bout de l'unité de temps est double de l'espace parcouru dans le même temps.*

Dans la formule [1], la vitesse v est exprimée en fonction du temps; mais on peut aussi l'exprimer en fonction de l'espace parcouru, en éliminant t entre les formules [1] et [2]. Pour cela, on tire de la première $t = \frac{v}{g}$, d'où $t^2 = \frac{v^2}{g^2}$. Portant cette valeur de t^2 dans la formule [2], on a $e = \frac{1}{2} g \times \frac{v^2}{g^2}$, ou $e = \frac{v^2}{2g}$, en supprimant le facteur commun g. Multipliant par $2g$ les deux membres de cette égalité, il vient $v^2 = 2ge$; si l'on extrait la racine, on a enfin $v = \sqrt{2ge}$ [3].

De cette dernière formule, on conclut que *lorsqu'un corps tombe dans le vide, la vitesse acquise en un temps donné est proportionnelle à la racine carrée de la hauteur de chute.*

Les formules $v = gt$ et $e = \frac{1}{2} gt^2$ ayant été obtenues en regardant la pesanteur comme une force accélératrice constante, et, par conséquent, dans le cas où le mouvement est uniformément accéléré, on peut les considérer comme les formules générales de ce genre de mouvement. Seulement, g étant l'accélération de vitesse imprimée, en chaque seconde, par la force accélératrice, la valeur de cette quantité g varie avec l'intensité de la force.

56. **Causes qui modifient l'intensité de la pesanteur.** — Trois causes font varier l'intensité de la pesanteur : l'altitude, c'est-à-dire l'élévation au-dessus du niveau des mers, l'aplatissement de la terre, et la force centrifuge.

1° L'attraction terrestre s'exerçant comme si toute la masse du globe était réunie à son centre, et cette attraction agissant en raison inverse du carré de la distance (37 et 38), il en résulte que l'intensité de la pesanteur croît ou décroît, quand les corps s'approchent ou s'écartent du centre de la terre. Toutefois, cette variation n'est pas apparente dans les phénomènes qui s'observent à la surface de notre globe, parce que son rayon moyen étant de 6 367 400 mètres, l'intensité de la pesanteur reste sensiblement la même lorsqu'un corps s'élève ou s'abaisse de quelques centaines de mètres. Mais pour des hauteurs plus considérables, la pesanteur ne peut plus être regardée comme constante. Il importe donc d'observer que les lois de la chute des corps énoncées au n° 52 ne doivent être admises que pour des corps qui tombent d'une faible hauteur.

2° L'intensité de la pesanteur est encore modifiée par l'aplatissement de la terre à ses deux pôles; car vers ces points, les corps sont plus rapprochés du centre du sphéroïde terrestre, et, par conséquent, plus attirés.

3° La troisième cause qui modifie l'intensité de la pesanteur, est la *force centrifuge*. On nomme ainsi une force à laquelle donne naissance le mouvement circulaire, et en vertu de laquelle les masses animées de ce mouvement tendent à s'éloigner de l'axe de rotation. On démontre, en mécanique, que la force centrifuge est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation, d'où il résulte que, sous un même méridien, cette force croît à mesure qu'on approche de l'équateur où elle atteint son maximum, puisque c'est là qu'a lieu la plus grande vitesse. Au pôle, la force centrifuge est nulle.

Sous l'équateur, la force centrifuge est directement opposée à la pesanteur et égale $\frac{1}{289}$ de son intensité. Or, 289 étant le carré de 17, on déduit de là que si le mouvement de rotation de la terre était 17 fois plus rapide, la force centrifuge, qui est proportionnelle au carré de la vitesse, serait, sous l'équateur, 289 fois plus intense qu'elle ne l'est, c'est-à-dire, égale à la pesanteur, et les corps ne pèseraient pas ; pour un mouvement de rotation plus rapide, ils seraient lancés dans l'espace par l'effet de la force centrifuge.

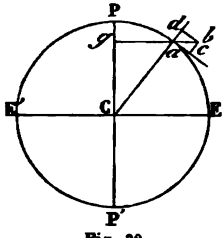


Fig. 30.

Quand on avance de l'équateur vers les pôles, la pesanteur est de moins en moins affaiblie par l'effet de la force centrifuge : d'abord, parce que cette dernière force décroît dans le même sens ; ensuite, parce que, sous l'équateur, elle est directement opposée à la pesanteur, tandis qu'en avançant vers les pôles, sa direction devient de plus en plus inclinée par rapport à celle de la pesanteur. C'est ce que montre la figure 30, dans laquelle PP′ représente l'axe de rotation de la terre, et EE′ l'équateur terrestre. En un point quelconque E de ce cercle, la force centrifuge est dirigée suivant CE, et agit tout entière pour diminuer l'intensité de la pesanteur; mais en un point *a*, plus rapproché du pôle, la force centrifuge étant représentée par une droite *ab* perpendiculaire à l'axe PP′, tandis que la pesanteur agit suivant *a*C, on voit que la pesanteur n'est plus directement opposée à la force centrifuge, mais seulement à sa composante *ad*, qui est d'autant plus petite par rapport à *ab*, que le point *a* est plus près du pôle.

57. **Mesure de l'intensité de la pesanteur.** — D'après ce qui précède, la pesanteur pouvant être considérée dans un même lieu et pour des hauteurs de chute peu considérables, comme une force

accélératrice constante, on prend pour mesure de son intensité la vitesse qu'elle imprime, en une seconde, aux corps qui tombent dans le vide (35), sans avoir égard à la masse, puisque, dans le vide, tous les corps tombent également vite (52).

Cette vitesse se représente par la lettre g. Elle croît de l'équateur au pôle; à Paris, elle est de $9^m,8088$. On verra bientôt comment elle se détermine, en chaque lieu, à l'aide du pendule (62).

58. **Pendule.** — On distingue deux sortes de pendules : le pendule simple et le pendule composé. Le *pendule simple* ou *pendule idéal*, est celui qui serait formé d'un point matériel pesant, suspendu, par un fil inextensible, sans masse et sans poids, à un point fixe autour duquel il pourrait librement *osciller*, c'est-à-dire prendre un mouvement de va-et-vient plus ou moins rapide. Ce pendule ne peut se réaliser; il est purement théorique et ne sert qu'à déterminer, par le calcul, les lois des oscillations du pendule.

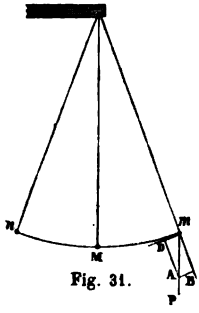


Fig. 31.

On nomme *pendule composé* tout corps qui peut osciller autour d'un point ou d'un axe fixe. Quand le pendule oscille autour d'un point, celui-ci prend le nom de *centre de suspension*; si le mouvement a lieu autour d'une droite horizontale, cette droite est appelée *axe de suspension*. Le pendule composé est le seul qu'on puisse construire. Sa forme peut varier à l'infini; mais, en général, il consiste en une masse métallique, lenticulaire ou sphérique, suspendue à une tige mobile autour d'un axe horizontal : tels sont les balanciers d'horloge; tel est le pendule P représenté dans la figure 29.

Les pendules composés sont suspendus, soit à l'aide d'un couteau analogue à celui des balances (fig. 17), soit à l'aide d'une lame d'acier, mince et flexible, qui se courbe légèrement à chaque oscillation.

Pour se rendre compte du mouvement oscillatoire du pendule, considérons d'abord un pendule simple cM, dont M soit le point matériel et c le centre de suspension (fig. 31). Lorsque le point M se trouve au-dessous du point c, sur la verticale passant par ce point, l'action de la pesanteur est détruite; mais si le point M est transporté en m, son poids P se décompose en deux forces, l'une

dirigée suivant le prolongement *m*B du fil, l'autre suivant la tangente *m*D à l'arc *m*M*n*. La composante *m*B est détruite par la résistance du point *c*, tandis que la composante *m*D sollicite le point matériel à descendre de *m* en M. Arrivé en ce dernier point, le pendule ne s'arrête pas; car, en vertu de son inertie, il est entraîné dans la direction M*n*.

Or, si l'on répète, en un point quelconque de l'arc M*n*, la même construction qu'en *m*, on reconnaît que la pesanteur qui, de *m* en M, a agi comme force accélératrice, agit, de M en *n*, comme force retardatrice. Elle enlève donc successivement au mobile la vitesse acquise pendant la descente; cette force doit donc diminuer la vitesse exactement de la même quantité dont elle l'a augmentée de *m* en M, en sorte qu'elle l'aura entièrement détruite lorsque le pendule se sera élevé en *n*, au-dessus de la position M, à la même hauteur que le point *m*. Le pendule revenant alors de *n* vers M, la même série de phénomènes se reproduit, et le pendule tend ainsi à osciller éternellement, en décrivant des arcs égaux des deux côtés du point M. Mais, dans les expériences, il n'en est jamais ainsi, deux causes contribuant sans cesse à ralentir le mouvement et même à le détruire : la première est la résistance du milieu dans lequel le pendule se meut, la seconde est le frottement qui se produit sur l'axe de suspension.

59. **Lois des oscillations du pendule.** — On nomme *oscillation* le passage du pendule d'une position extrême *m* à l'autre position extrême *n*. L'arc *mn* est l'*amplitude* d'oscillation. Enfin, la *longueur* du pendule simple est la distance du point de suspension *c* au point matériel M.

On démontre, en mécanique rationnelle, que les oscillations du pendule simple, dans le vide, sont soumises aux quatre lois suivantes :

1° *Pour un même pendule, les petites oscillations sont isochrones*, c'est-à-dire qu'elles se font très-sensiblement en temps égaux, tant que leurs amplitudes ne dépassent pas une certaine limite, de 2 ou 3 degrés au plus. Le calcul apprend que la résistance de l'air augmente la durée des oscillations par suite de la perte de poids qu'éprouve le pendule dans l'air (160), mais que l'isochronisme persiste dans l'air comme dans le vide; seulement, l'amplitude allant en diminuant, le pendule finit nécessairement par s'arrêter.

C'est Galilée qui, le premier, constata l'isochronisme des petites oscillations du pendule. On rapporte qu'il fit cette découverte, jeune

encore, en observant les mouvements d'une lampe suspendue à la voûte de la cathédrale de Pise.

2° *Pour des pendules de même longueur, la durée des oscillations est la même, quelle que soit la substance dont le pendule est formé.* C'est-à-dire que des pendules simples dont le point matériel serait en liége, en plomb, en or, exécutent le même nombre d'oscillations dans le même temps, s'ils sont d'égale longueur.

3° *Pour des pendules inégaux, la durée des oscillations est proportionnelle à la racine carrée de la longueur.* C'est-à-dire que la longueur d'un pendule devenant 4, 9, 16... fois plus grande, la durée des oscillations l'est seulement 2, 3, 4... fois davantage.

4° *En différents lieux de la terre, la durée des oscillations, pour des pendules de même longueur, est en raison inverse de la racine carrée de l'intensité de la pesanteur.*

Ces lois découlent de la formule $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, à laquelle on est conduit en appliquant le calcul au mouvement du pendule simple. Dans cette formule, t représente la durée d'une oscillation; l, la longueur du pendule; g, l'intensité de la pesanteur, c'est-à-dire la vitesse acquise, au bout d'une seconde, par un corps qui tombe dans le vide (57). Quant à π, c'est une quantité constante qui représente le rapport de la circonférence au diamètre; on trouve, en géométrie, que π égale 3,141592.....

Les deux premières lois du pendule se déduisent immédiatement de la formule $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$; car cette formule ne contenant ni l'amplitude de l'oscillation, ni la densité de la substance dont le pendule est formé, la valeur de t est indépendante de ces deux quantités.

Quant aux deux dernières lois, elles sont aussi comprises dans la formule, puisque, sous le radical, l entre en numérateur et g en dénominateur.

60. **Longueur du pendule composé.** — Les lois et la formule ci-dessus s'appliquent aussi au pendule composé; mais alors il faut définir ce qu'on entend par *longueur* de ce pendule. Pour cela, observons que tout pendule composé étant formé d'une tige pesante terminée par une masse plus ou moins considérable, les divers points matériels de ce système tendent, d'après la troisième loi du pendule, à décrire leurs oscillations dans des temps d'autant plus longs qu'ils sont plus éloignés du point de suspension. Or, tous ces points étant invariablement liés entre eux, leurs oscillations se font nécessairement dans le même temps. Il résulte de là que le mouvement des points les plus rapprochés de l'axe de suspension se trouve retardé, tandis que celui des points les plus éloignés est

accéléré. Entre ces deux positions extrêmes, il y a donc des points qui ne sont ni accélérés ni retardés, et qui oscillent comme s'ils n'étaient pas liés au reste du système. Ces points étant équidistants de l'axe de suspension, leur ensemble constitue un *axe d'oscillation* parallèle au premier. C'est la distance de l'axe de suspension à l'axe d'oscillation qu'on nomme *longueur du pendule composé*. C'est-à-dire que *la longueur d'un pendule composé est celle du pendule simple qui ferait ses oscillations dans le même temps.*

L'axe d'oscillation jouit de la propriété d'être réciproque de l'axe de suspension; c'est-à-dire qu'en suspendant le pendule par son axe d'oscillation, la durée des oscillations reste la même, ce qui montre que la longueur n'est pas changée. Cette propriété démontrée pour la première fois par Huygens, physicien hollandais, donne le moyen de trouver expérimentalement la longueur du pendule composé. Pour cela, on retourne le pendule et on le suspend au moyen d'un axe mobile, qu'on place, après quelques tâtonnements, de manière que le nombre des oscillations, dans le même temps, soit le même qu'avant le retournement. Ce résultat obtenu, la longueur cherchée est la distance du deuxième axe de suspension au premier. Si l'on substitue alors la valeur obtenue ainsi, à la place de l, dans la formule du pendule simple, celle-ci devient applicable au pendule composé, et les lois des oscillations sont les mêmes que pour le pendule simple.

La longueur du pendule qui *bat la seconde*, c'est-à-dire qui fait ses oscillations en 1″, varie avec l'intensité de la pesanteur; elle est :

Sous l'équateur.	0^m,990925
A Paris.	0 ,993866
A 10° du pôle.	0 ,995924

61. **Vérification des lois du pendule.** — On ne peut vérifier les lois du pendule simple qu'au moyen du pendule composé, en ayant soin de construire celui-ci de manière qu'il atteigne, autant que possible, les conditions du premier. Pour cela on suspend, à l'extrémité d'un fil fin, une petite sphère d'une substance très-dense, par exemple, de plomb ou de platine. Le pendule ainsi formé oscille sensiblement comme le pendule simple dont la longueur serait égale à la distance du centre de la petite sphère au point de suspension.

Pour vérifier la loi de l'isochronisme des petites oscillations, on fait osciller le pendule ainsi construit, et on compte le nombre d'oscillations qu'il exécute, en temps égaux, lorsque l'amplitude est successivement de 3, 2 ou 1 degré. On observe ainsi que le nombre d'oscillations est constant.

Pour démontrer la seconde loi, on prend plusieurs pendules B, C, D (fig. 32), construits de la même manière que le précédent, ayant tous des longueurs égales, et terminés par des sphères de même diamètre, mais de substances différentes, par exemple, de plomb, de cuivre, d'ivoire. On observe qu'en négligeant la résistance de l'air tous ces pendules font, dans le même temps, le même nombre d'oscillations; d'où l'on conclut que la pesanteur agit sur toutes les substances avec la même intensité, ce qu'on a déjà constaté (52).

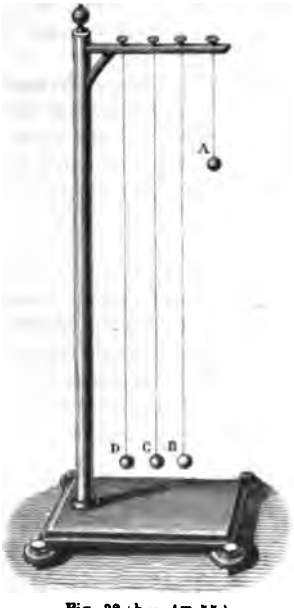


Fig. 32 ($h = 1^m,55$).

On vérifie la troisième loi en faisant osciller des pendules dont les longueurs sont respectivement 1, 4, 9.... et on trouve que les nombres d'oscillations correspondants sont comme 1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$..., ce qui montre que leur durée est successivement 1, 2, 3...

La quatrième loi ne peut pas se démontrer directement par l'expérience.

62. **Usages du pendule.** — Le pendule sert à constater, ainsi qu'on vient de le voir dans le paragraphe précédent, que la pesanteur sollicite tous les corps avec la même intensité. Il sert encore à déterminer l'intensité de la pesanteur sur les différents points de notre globe, et par suite, la forme de celui-ci, la masse des montagnes et la densité de la terre. L'isochronisme de ses oscillations l'a fait appliquer comme régulateur aux horloges. Enfin, récemment, M. Foucaud l'a fait servir à la démonstration expérimentale du mouvement de rotation diurne de la terre.

Pour mesurer l'intensité de la pesanteur (57) à l'aide du pendule, on résout l'équation $t = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ (59), par rapport à g. En élevant les deux membres au carré, on trouve $t^2 = \pi^2 \frac{l}{g}$. Multipliant par g et divisant ensuite par t^2, il vient $g = \frac{\pi^2 l}{t^2}$. D'où l'on voit que pour connaître g, il faut commencer par mesurer la longueur l d'un pendule composé (60), puis mesurer la durée t de ses oscillations; ce qui s'obtient en cherchant combien il fait d'oscillations dans un nombre de secondes connu, et en divisant ce dernier nombre par le nombre d'oscillations.

C'est en opérant ainsi qu'on a déterminé la valeur de g en différents points du globe, et que Borda et Cassini ont trouvé qu'elle est, à Paris, de $9^m,8088$. Mais en tenant compte de ce que la perte de poids d'un corps dans l'air est plus grande quand le corps est en mouvement que lorsqu'il est en repos, et en faisant subir au mouvement du pendule la correction que cette inégale perte de poids nécessite, M. Bessel, astronome de Kœnigsberg, a trouvé que la vraie valeur de g, à Paris, est de $9^m,8096$.

Une fois la valeur de g connue, en chaque lieu, on en déduit, par le calcul, la distance au centre de la terre, et, par suite, la forme de celle-ci.

C'est Huygens qui, le premier, appliqua le pendule comme régulateur aux horloges, en 1657, et le ressort spiral aux montres, en 1675. Lorsque le pendule est employé comme régulateur, il porte, à la partie supérieure de sa tige, une pièce en arc de cercle, terminée par deux palettes, laquelle est nommée *échappement à ancre*, à cause de sa forme. Le pendule étant au repos, une des palettes appuie sur une des dents d'une roue qu'on appelle *roue de rencontre*, et tout le mouvement d'horlogerie est arrêté. Mais lorsque le pendule est en mouvement, la palette, à chaque oscillation, laisse passer une dent de la roue de rencontre. Or, les oscillations du pendule étant isochrones, la roue de rencontre et le mécanisme de l'horloge, qui en est solidaire, marchent et s'arrêtent à des intervalles égaux, et, par conséquent, indiquent des divisions égales du temps.

63. Problèmes sur la pesanteur. — I. Un corps tombant librement dans le vide, quelle sera sa vitesse, à Paris, après 45 secondes de chute?

Cette question se résout à l'aide de la formule $v = gt$ (55), en y faisant $g = 9^m,8088$ (57), et $t = 45^s$; ce qui donne

$$v = 9^m,8088 \times 45 = 441^m,396.$$

A une autre latitude que celle de Paris, la valeur de g n'étant plus $9^m,8088$, la vitesse acquise par le corps qui tombe serait plus grande ou plus petite que $441^m,396$.

II. Pendant combien de temps doit tomber un corps, dans le vide, pour acquérir, à Paris, une vitesse de 600 mètres, qui est celle d'un boulet de canon?

De la formule $v = gt$, on tire $t = \frac{v}{g}$, d'où, remplaçant v et g par leurs valeurs,

$$\text{on a } t = \frac{600}{9,8088} = 61^s,16.$$

III. Quel est le temps nécessaire à un corps pour tomber, dans le vide, d'une hauteur de 1000 mètres?

De la formule $e = \frac{1}{2} gt^2$ (55), on tire $t = \sqrt{\frac{2e}{g}}$, d'où

$$t = \sqrt{\frac{2000}{9,8088}} = 14^s,28.$$

IV. De quelle hauteur devrait tomber un corps, dans le vide, pour acquérir une vitesse de 300 mètres?

La formule $v^2 = 2ge$ (55) donne $e = \frac{v^2}{2g}$, d'où

$$e = \frac{90000}{2.9,8088} = 4587^m,7.$$

V. Sur un plan incliné dont la longueur AB (fig. 28) égale 1000 mètres, et la hauteur BC 5 mètres, quel est l'effort nécessaire pour traîner un poids de 2500 kilogrammes, abstraction faite du frottement?

En représentant par P le poids, et par F la force cherchée, on a vu (53) qu'on a l'égalité $\frac{F}{P} = \frac{BC}{AB}$, d'où

$$F = \frac{P \times BC}{AB} = \frac{2500 \times 5}{1000} = 12^k,500.$$

VI. Un projectile étant lancé verticalement, de bas en haut, dans le vide, avec une vitesse initiale de $245^m,22$, on demande après quel temps le mobile s'arrêtera pour retomber, et à quelle hauteur il s'élèvera?

Soient a la vitesse initiale imprimée au mobile et t la durée de l'ascension; la pesanteur, agissant pendant ce temps comme force retardatrice, diminue la vitesse a d'une quantité égale à g en une seconde, et d'une quantité gt au bout de t secondes; on a donc, au moment où le corps s'arrête, $gt = a$, d'où

$$t = \frac{a}{g} = \frac{245,22}{9,8088} = 25^s.$$

Pour calculer la hauteur à laquelle s'élève le mobile, observons que, pendant son ascension, la pesanteur lui enlevant graduellement la vitesse qu'elle lui communiquerait, en temps égal, s'il tombait, il faut que le corps mette à s'élever à sa plus grande hauteur e, précisément le temps qu'il mettrait à en descendre. Donc la hauteur d'ascension peut se calculer par la formule $e = \frac{1}{2} gt^2$ (55), qui donne

$$e = 4,9044 \times 625 = 3065^m,25.$$

CHAPITRE IV.

FORCES MOLÉCULAIRES.

64. **Nature des forces moléculaires.** — Les phénomènes que présentent les corps font voir que leurs molécules sont constamment sollicitées par deux forces contraires, dont l'une tend à les rapprocher et l'autre à les écarter. La première, qui porte le nom d'*attraction moléculaire*, ne varie, pour un même corps, qu'avec la distance; la seconde, due à la chaleur, varie avec l'intensité de cet agent et avec la distance. C'est du rapport mutuel de ces forces et de l'orientation qu'elles impriment aux molécules, que résulte l'état solide, liquide ou gazeux (5).

L'attraction moléculaire ne s'exerce qu'à des distances infiniment petites. Son effet est nul à toute distance sensible, ce qui la distingue de la pesanteur et de la gravitation universelle, qui agissent à toutes les distances. On ignore suivant quelles lois elle s'exerce.

Selon la manière de la considérer, l'attraction moléculaire se désigne sous les noms de *cohésion*, d'*affinité* ou d'*adhésion*.

65. **Cohésion.** — La *cohésion* est la force qui lie entre elles les molécules similaires, c'est-à-dire de même nature, deux molécules d'eau, par exemple, ou deux molécules de fer. Cette force est à peu près nulle dans les gaz, faible dans les liquides, et très-grande dans les solides. Son intensité décroît lorsque la température s'élève, tandis qu'alors la force répulsive due au calorique augmente. C'est pourquoi, lorsqu'on chauffe les corps solides, ils finissent par se liquéfier et même par-passer à l'état de fluide aériforme.

La cohésion varie non-seulement avec la nature des corps, mais encore avec l'arrangement de leurs molécules, comme il arrive dans la cuisson des argiles, dans la trempe de l'acier. C'est aux modifications qu'éprouve la cohésion qu'il faut rapporter plusieurs propriétés des corps, telles que la ténacité, la ductilité, la dureté.

Dans les liquides pris en grande masse, la pesanteur l'emporte sur la cohésion. C'est ce qui fait que les liquides, obéissant sans cesse à la première force, n'affectent aucune forme particulière et prennent toujours celle des vases qui les contiennent. Mais, sous une petite masse, c'est la cohésion qui l'emporte, et les liquides affectent alors la forme sphéroïdale. C'est ce qui a lieu pour les

gouttes de rosée suspendues aux feuilles des plantes; le même phénomène s'observe lorsqu'on répand, sur une surface plane horizontale, un liquide qui ne la mouille pas, comme du mercure sur du bois. L'expérience peut même se faire avec de l'eau, si d'avance on a projeté sur la surface une poussière légère, du noir de fumée, par exemple.

66. **Affinité.** — L'*affinité* est l'attraction qui s'exerce entre des substances hétérogènes : dans l'eau, par exemple, qui est formée de deux atomes d'hydrogène pour un d'oxygène, c'est l'affinité qui unit ces deux corps; mais c'est la cohésion qui lie deux molécules d'eau. C'est-à-dire que dans les corps composés, la cohésion et l'affinité agissent simultanément, tandis que dans les corps simples il n'y a lieu de considérer que la cohésion.

C'est à l'affinité qu'il faut rapporter tous les phénomènes de combinaison et de décomposition chimiques.

Toute cause qui tend à affaiblir la cohésion augmente l'affinité. Cette dernière force est, en effet, favorisée par l'état de division; elle l'est aussi par l'état liquide ou gazeux. Elle se développe surtout par l'*état naissant*, c'est-à-dire par l'état où se trouve un corps lorsque, se dégageant d'une combinaison, il est isolé et libre d'obéir aux plus faibles affinités. Enfin, l'affinité présente des effets très-variables suivant l'élévation de température. Dans certains cas, en écartant les molécules et en diminuant la cohésion, la chaleur favorise les combinaisons. Entre le soufre et l'oxygène, par exemple, l'affinité est sans effet à la température ordinaire, tandis qu'à une température élevée ces corps se combinent en donnant naissance à un composé très-stable, l'acide sulfureux. Dans d'autres cas, au contraire, la chaleur détruit les combinaisons en communiquant à leurs éléments une inégale expansibilité. C'est ainsi que beaucoup d'oxydes métalliques sont décomposés par l'action de la chaleur.

67. **Adhésion.** — On nomme *adhésion* l'attraction moléculaire qui se manifeste entre les corps en contact. Deux glaces, par exemple, étant superposées, finissent par adhérer tellement qu'on ne peut plus les séparer sans les rompre. Cette force agit non-seulement entre les solides, mais entre les solides et les liquides, entre les solides et les gaz.

L'adhésion entre les solides n'est point un effet de la pression atmosphérique, car elle s'observe dans le vide. Elle croît avec le degré de poli des surfaces et avec la durée de leur contact; en effet, la résistance à la séparation est d'autant plus grande que le

contact a été plus longtemps prolongé. Enfin, l'adhésion entre les corps solides est indépendante de leur épaisseur, ce qui indique que l'attraction moléculaire ne s'exerce qu'à de très-petites distances.

Plongés dans l'eau, dans l'alcool et dans la plupart des liquides, les corps solides en sortent recouverts d'une couche liquide : c'est l'adhésion qui la soutient.

Il se produit entre les solides et les gaz la même adhésion qu'entre les solides et les liquides. En effet, si l'on plonge une lame de verre ou de métal dans l'eau, on voit des bulles d'air apparaître à sa surface. Comme, dans ce cas, l'eau ne pénètre pas dans les pores de la lame, ces bulles ne sauraient provenir de l'air qui en serait expulsé. Elles sont donc uniquement dues à une couche d'air qui recouvrait la lame et la *mouillait* à la manière d'un liquide.

Nous ferons connaître bientôt, sous les noms de *capillarité*, d'*endosmose*, d'*absorption* et d'*imbibition*, une série de phénomènes qui ont aussi pour cause l'attraction moléculaire.

CHAPITRE V

PROPRIÉTÉS PARTICULIÈRES AUX SOLIDES.

68. **Diverses propriétés particulières.** — Après avoir fait connaître les principales propriétés communes aux solides, aux liquides et aux gaz, nous traiterons ici des propriétés particulières aux solides. Ces propriétés sont : l'*élasticité de traction*, l'*élasticité de torsion*, l'*élasticité de flexion*, la *ténacité*, la *ductilité* et la *dureté*.

69. **Élasticité de traction.** — Nous avons déjà traité de l'élasticité comme propriété générale (19) ; mais il s'agissait seulement de l'élasticité développée par la pression. Or, dans les solides, l'élasticité peut encore se manifester par traction, par torsion et par flexion.

Pour étudier les lois de l'élasticité de traction, Savart a fait usage de l'appareil représenté dans la figure 33. Cet appareil se compose d'un support en bois auquel on suspend les tiges ou les fils sur lesquels on veut expérimenter. On fixe, à leur extrémité inférieure, un plateau destiné à recevoir des poids, et on marque, sur leur longueur, deux points de repère A et B, dont on mesure exacte-

ment la distance, à l'aide d'un cathétomètre, avant que le plateau soit chargé.

On nomme *cathétomètre* une règle de cuivre K, divisée en millimètres, et pouvant prendre une position verticale au moyen d'un pied à vis calantes. Une lunette, exactement d'équerre avec la règle, peut glisser dans le sens de sa longueur, et porte un vernier qui donne les cinquantièmes de millimètres. C'est en fixant successivement cette lunette en regard des points A et B, comme on le voit dans la figure, qu'on obtient, sur l'échelle graduée, la distance de ces deux points. Plaçant ensuite des poids dans le bassin, et mesurant de nouveau l'intervalle des points A et B, on détermine l'allongement.

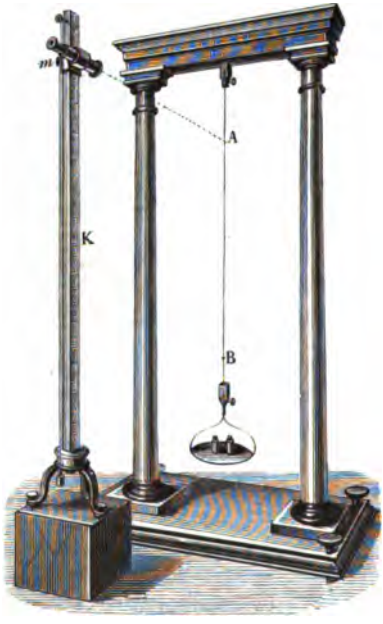


Fig. 33.

Tant que la limite d'élasticité n'a pas été dépassée, la traction des tiges et des fils est soumise aux trois lois suivantes :

1° *Les tiges et les fils ont une élasticité parfaite, c'est-à-dire qu'ils reprennent exactement leur longueur primitive aussitôt que la traction cesse.*

2° *Pour une même substance et un même diamètre, l'allongement est proportionnel à la force de traction et à la longueur.*

3° *Pour des tiges ou des fils de même longueur, de même matière, mais d'inégale grosseur, les allongements sont en raison inverse des carrés des diamètres.*

Le calcul et l'expérience démontrent que, lorsque les corps s'allongent par traction, leur volume augmente.

M. Wertheim, qui a fait de nombreuses expériences sur l'élas-

ticité des métaux, a constaté que l'élasticité décroît d'une manière continue à mesure que la température s'élève de — 15° à 200°; le fer et l'acier font exception, leur élasticité augmentant jusqu'à 100° et diminuant ensuite. Le même physicien a trouvé qu'en général *toutes les causes qui augmentent la densité augmentent en même temps l'élasticité et réciproquement.*

70. **Élasticité de torsion.** — Les lois de la torsion des fils ont été déterminées par Coulomb, physicien français, mort en 1806. Dans ses recherches, ce savant faisait usage d'un appareil qu'on nomme *balance de torsion*, lequel se compose d'un fil métallique fin, pincé à sa partie supérieure, et tendu par un poids auquel est fixée une aiguille horizontale. Au-dessous est un cercle gradué dont le centre se trouve sur le prolongement du fil lorsque celui-ci est vertical. Si l'on écarte l'aiguille de sa position d'équilibre, d'un certain angle, qui est l'*angle de torsion*, la force nécessaire pour obtenir cet angle est elle-même la *force de torsion*. Après cette déviation, les molécules qui étaient disposées en ligne droite, suivant la longueur du fil, le sont suivant une hélice enroulée autour de ce fil. Si la limite d'élasticité n'a pas été dépassée, les molécules tendent à reprendre leur position primitive, et y reviennent, en effet, aussitôt que la force de torsion n'agit plus; mais elles ne s'y arrêtent pas. En vertu de leur vitesse acquise, elles dépassent cette position en donnant naissance à une torsion en sens contraire. L'équilibre se trouvant rompu de nouveau, le fil revient sur lui-même, et l'aiguille ne s'arrête au zéro du cadran qu'après un certain nombre d'oscillations des deux côtés de ce point.

Au moyen de l'appareil qui vient d'être décrit, Coulomb a constaté que, lorsque l'amplitude des oscillations ne dépasse pas un petit nombre de degrés, ces oscillations sont soumises aux quatre lois suivantes :

1° *Elles sont très-sensiblement isochrones.*

2° *Pour un même fil, l'angle de torsion est proportionnel à la force de torsion.*

3° *Pour une même force de torsion et des fils de même diamètre, l'angle de torsion est proportionnel à la longueur des fils.*

4° *Pour une même force et une même longueur de fil, l'angle de torsion est inversement proportionnel à la quatrième puissance des diamètres.*

71. **Élasticité de flexion.** — Tous les solides taillés en lames minces et fixés par une de leurs extrémités, peuvent, après avoir

été plus ou moins courbés, revenir à leur première forme lorsqu'ils sont abandonnés à eux-mêmes. Cette propriété est très-sensible dans l'acier trempé, le caoutchouc, le bois, le papier.

L'élasticité de flexion trouve de nombreuses applications dans les arcs, les arbalètes, les ressorts de montre, les ressorts de voiture, les pesons qui servent de balances, et les dynamomètres destinés à mesurer la force des moteurs. L'élasticité du crin, de la laine, de la plume, est utilisée dans les matelas et les coussins en usage dans l'économie domestique.

Quelle que soit l'espèce d'élasticité que l'on considère, nous avons déjà observé (49) qu'il y a toujours une limite à l'élasticité, c'est-à-dire un déplacement moléculaire au delà duquel les corps sont brisés, ou du moins ne reprennent plus leur forme première. Plusieurs causes peuvent faire varier cette limite. On constate, en effet, que l'élasticité de plusieurs métaux est augmentée par l'*écrouissage*, c'est-à-dire par le rapprochement des molécules, à froid, au moyen de la filière, du laminoir ou du marteau. Quelques substances, comme l'acier, la fonte, le verre, deviennent aussi plus élastiques et en même temps plus dures par la *trempe* (76).

L'élasticité est, au contraire, diminuée par le *recuit*, opération qui consiste à porter les corps à une température moins élevée que pour la trempe et à les refroidir ensuite lentement. C'est par le recuit qu'on gradue à volonté l'élasticité des ressorts. Le verre chauffé éprouvant une véritable trempe lorsqu'il se refroidit trop rapidement, c'est pour diminuer la fragilité des objets de verre récemment fabriqués qu'on les recuit sur un foyer, dont on les éloigne ensuite lentement.

72. **Ténacité.** — La *ténacité* est la résistance qu'opposent les corps à la traction. Pour évaluer cette force, on façonne les corps en tiges cylindriques ou prismatiques, et on les soumet, dans le sens de leur longueur, à une traction mesurée en kilogrammes et suffisante pour déterminer la rupture.

La ténacité est directement proportionnelle à la force qui détermine la rupture, et inversement proportionnelle à la section transversale des fils ou des prismes. D'après de nombreuses expériences sur les métaux, la force nécessaire à la rupture est à peu près triple de celle qui correspond à la limite d'élasticité.

La ténacité diminue avec la durée de la traction. On constate, en effet, que les tiges métalliques et autres cèdent, après un certain temps, à des charges moindres que celles qui seraient nécessaires pour produire immédiatement la rupture ; dans tous les cas,

la résistance à la traction est moindre que la résistance à la pression.

La ténacité ne varie pas seulement d'une substance à une autre; mais, à égalité de matière, elle varie encore avec la forme des corps. Pour des sections équivalentes, le prisme est moins résistant que le cylindre. Pour une quantité de matière donnée, le cylindre creux est plus résistant que le cylindre plein, et le *maximum* de ténacité a lieu lorsque le rayon extérieur est au rayon intérieur dans le rapport de 11 à 5.

Pour un même corps, la forme a la même influence sur la résistance à l'écrasement que sur la résistance à la traction. En effet, un cylindre creux, à masse et à hauteur égales, est plus résistant qu'un cylindre plein; d'où il résulte que les os des animaux, les plumes des oiseaux, les tiges des graminées et d'un grand nombre de plantes, opposent plus de résistance que s'ils étaient pleins, la masse restant la même.

Enfin, la ténacité, de même que l'élasticité, varie pour un même corps avec le sens que l'on considère. Dans les bois, par exemple, la ténacité et l'élasticité sont plus grandes dans le sens des fibres que dans le sens transversal. Cette différence s'observe, en général, dans tous les corps dont la contexture n'est pas la même suivant toutes les directions.

Charges en kilogrammes, par millimètre carré, qui déterminent la rupture.

Plomb coulé	2,21	Fer étiré	63,80
— étiré	2,36	— recuit	50,25
Étain coulé	4,16	Acier fondu étiré	83,80
— étiré	3,..	Antimoine coulé	0,67
Or étiré	28,..	Bismuth coulé	0,97
— recuit	11,..		
Argent étiré	29,..	*Bois dans le sens des fibres.*	
— recuit	16,40		
Zinc étiré	15,77	Buis	14,..
— recuit	14,40	Frêne	12,..
Cuivre étiré	41,..	Sapin	9,..
— recuit	31,60	Hêtre	8,..
Platine étiré	35,..	Chêne	7,..
— recuit	26,75	Acajou	5,..

Dans le tableau ci-dessus, les corps sont supposés à la température ordinaire; mais, à une température plus élevée, la ténacité décroît rapidement. M. Séguin aîné, qui a fait récemment des

recherches à ce sujet, sur le fer et le cuivre rouge, a trouvé les ténacités suivantes, en kilogrammes, par millimètre carré :

A 10°, fer,	60^k; à 370°,	54^k;	à 500°, 35^k.
Cuivre rouge,	21^k; —	$7^k,7$;	—

73. **Dynamomètre de M. Perreaux.** — M. Perreaux, mécanicien à Paris, a construit récemment un nouveau dynamomètre destiné à mesurer la ténacité des corps. Cet appareil consiste en un banc de

Fig. 34 (1 = 60).

fonte P (fig. 34), sur lequel glissent deux chariots portant chacun une poupée *a* et *b*. Le premier chariot est invariablement lié à un ressort à deux lames courbes, renfermé dans la caisse H. Quand on tire sur la poupée *a*, le chariot qui le porte est entraîné, et le ressort, en s'allongeant, transmet le mouvement à une aiguille C, qui se meut sur un cadran, et indique, en kilogrammes, la force de traction.

Quant au chariot qui porte la seconde poupée *b*, il est percé, à sa partie inférieure, d'un écrou dans lequel s'engage une vis *o*. Lorsqu'on fait tourner la manivelle M de gauche à droite, c'est cette vis qui fait avancer le chariot et la poupée *b* vers l'extrémité A du banc. La tige *m* placée sur le côté de l'appareil est destinée à amortir la détente du ressort qui est sous le cadran. Si, au moment de la rupture, ce ressort se détendait trop brusquement, il pourrait lui-même se briser. Mais en se détendant, il presse sur la tige *m*,

qui agit sur la pièce *n*, et celle-ci transmet son mouvement à un volant V à l'aide d'engrenages; c'est la force vive absorbée par ce volant qui ralentit la détente du ressort.

Cela posé, afin de déterminer la force nécessaire pour rompre un fil métallique, ou toute autre matière, on en fixe une extrémité à la poupée *a*, et l'autre à la poupée *b*. Tournant alors la vis lentement, le fil se tend, l'aiguille C marche, et continuant à tourner jusqu'à ce que la rupture se produise, l'aiguille indique alors, en kilogrammes, la traction qui a déterminé la rupture.

En expérimentant avec le dynamomètre que nous venons de décrire, sur des bandes de toile de 40 centimètres de long sur 5 centimètres de large, et sur des bandes de drap de même largeur, mais seulement de 10 centimètres de longueur, on a trouvé récemment, au ministère de la guerre, les résultats suivants :

	Allongements au moment de la rupture.	Tractions qui déterminent la rupture.
Toile à voile	2 centim.	356 kil.
Toile à tente	3	190
Toile à draps pour lits militaires	3	120
Toile à chemises pour militaires	3	100
Drap bleu pour collége	5	25
Drap bleu pour la préfecture de police	5	30
Papier pour étiquettes sur les chemins de fer	»	20
Corde de piano	5	100

Ces expériences ont montré que les draps de meilleure qualité sont les plus élastiques, c'est-à-dire ceux qui atteignent le plus grand allongement avant de se rompre.

74. Ductilité. — On nomme *ductilité* la propriété que possèdent un grand nombre de corps de changer de forme par l'effet de pressions ou de tractions plus ou moins considérables.

Pour certains corps, comme l'argile, la cire, de faibles efforts sont suffisants pour produire une déformation; pour d'autres, comme le verre, les résines, il faut en outre l'action de la chaleur; pour les métaux, il faut des efforts puissants, comme la percussion, la filière, le laminoir.

La ductilité prend le nom de *malléabilité* lorsqu'elle se produit

sous le marteau. Le métal le plus malléable est le plomb, le plus ductile au laminoir est l'or; à la filière, c'est le platine.

La grande ductilité du platine a permis à Wollaston d'obtenir des fils de ce métal qui n'avaient que $\frac{1}{1200}$ de millimètre de diamètre. Pour arriver à ce résultat, ce savant recouvrait d'argent un fil de platine de $\frac{1}{4}$ de millimètre de diamètre, de manière à obtenir un cylindre de 5 millimètres de grosseur, dont l'axe seul était en platine. En tirant ce cylindre à la filière jusqu'à ce qu'il fût aussi fin que possible, les deux métaux s'allongeaient également. Faisant alors bouillir le fil dans l'acide azotique, l'argent était dissous, et le fil de platine restait seul; 1000 mètres de ce fil ne pesaient que 5 centigrammes.

75. **Dureté.** — La *dureté* est la résistance qu'offrent les corps à être rayés ou usés par d'autres corps.

Cette propriété n'est que relative, car un corps, dur par rapport à une substance, est mou par rapport à une autre. On distingue la dureté relative de deux corps en cherchant celui qui raie l'autre sans en être rayé. On a constaté ainsi que le plus dur de tous les corps est le diamant, car il les raie tous et n'est rayé par aucun. Après lui viennent le saphir, le rubis, le cristal de roche, les silex, les grès, etc. Les métaux à l'état de pureté sont assez mous.

Les alliages sont plus durs que leurs métaux. C'est pour augmenter la dureté de l'or et de l'argent, dans la bijouterie et dans la fabrication des monnaies, qu'on les allie au cuivre.

La dureté d'un corps n'est pas en rapport avec sa résistance à la pression. Le verre, le diamant, sont beaucoup plus durs que le bois, mais ils résistent beaucoup moins au choc du marteau.

La dureté des corps est utilisée dans les poudres à polir, telles que l'émeri, la ponce, le tripoli. Le diamant, étant le plus dur de tous les corps, ne peut s'user qu'à l'aide de l'*égrisée*, qui n'est elle-même que du diamant pulvérisé.

76. **Trempe.** — La *trempe* est le refroidissement brusque d'un corps après qu'il a été porté à une température élevée. Dans cette opération, l'acier et la fonte acquièrent une grande dureté, et c'est surtout dans ce but que la trempe est utilisée. Tous les instruments tranchants sont en acier trempé. Mais il est des corps sur lesquels la trempe produit un effet tout opposé. L'alliage des *tamtams*, qui est composé d'une partie d'étain sur quatre de cuivre, devient ductile et malléable lorsqu'il est refroidi brusquement; au contraire, il est dur et fragile comme le verre lorsqu'il est refroidi avec lenteur.

LIVRE III

DES LIQUIDES

CHAPITRE PREMIER

HYDROSTATIQUE.

77. **Objet de l'hydrostatique.** — *L'hydrostatique* est la science qui a pour objet l'étude des conditions d'équilibre des liquides et celle des pressions qu'ils transmettent, soit dans leur masse, soit sur les parois des vases qui les contiennent.

La science qui traite du mouvement des liquides se nomme *hydrodynamique*, et l'application des principes de cette dernière science à l'art de conduire et d'élever les eaux se désigne spécialement sous le nom d'*hydraulique*. Nous ne traiterons ici que de l'hydrostatique.

78. **Caractères généraux des liquides.** — On a déjà vu (5) que les liquides sont des corps dont les molécules, par suite d'une extrême mobilité, cèdent au plus léger effort qui tend à les déplacer. Leur fluidité n'est cependant pas parfaite : il existe toujours entre leurs molécules une adhérence qui produit une viscosité plus ou moins grande.

La fluidité des liquides se retrouve, mais à un plus haut degré, dans les gaz ; ce qui distingue ces deux espèces de corps, c'est que les liquides ne sont doués que d'une compressibilité à peine sensible, tandis que les fluides aériformes sont éminemment compressibles et expansibles.

La fluidité des liquides se manifeste par la facilité avec laquelle ces corps prennent toutes sortes de formes ; quant à leur faible compressibilité, elle se constate par l'expérience suivante.

79. **Compressibilité des liquides.** — D'après l'expérience des académiciens de Florence rapportée précédemment (15), on a regardé longtemps les liquides comme complétement incompressibles. Depuis, des recherches sur le même sujet ont été faites successivement, en Angleterre, par Canton, en 1761, et par Perkins, en 1819 ;

à Copenhague, par Œrsted, en 1823; enfin, en 1827, par Colladon et Sturm; et il a été constaté, dans ces diverses expériences, que les liquides sont réellement compressibles.

Les appareils destinés à mesurer la compressibilité des liquides ont reçu le nom de *piézomètres*. Nous allons décrire ici celui d'Œrsted avec les modifications qui y ont été faites par MM. Despretz et Saigey. Cet appareil se compose d'un cylindre de cristal à parois très-épaisses, et d'un diamètre de 8 à 9 centimètres (fig. 35). Ce cylindre, qui est complétement rempli d'eau, est fermé, à sa base, par un pied de bois, dans lequel il est solidement mastiqué, et, à sa partie supérieure, il s'ajuste dans une pièce cylindrique de cuivre, fermée par un plateau qui se dévisse à volonté. Ce plateau porte un entonnoir R destiné à introduire l'eau dans le cylindre, et un petit corps de pompe dans lequel est un piston fermant hermétiquement et qu'on fait marcher au moyen d'une vis de pression P.

Fig. 35 (h = 64).

Dans l'intérieur de l'appareil est un réservoir de verre A rempli du liquide à comprimer. Ce réservoir se termine, à sa partie supérieure, par un tube capillaire qui se recourbe et vient plonger dans un bain de mercure O. Ce tube a été divisé d'avance en parties d'égale capacité, et on a déterminé combien le réservoir A contient de ces parties; ce qui s'obtient en cherchant le poids P du mercure que contient le réservoir A, et le poids p du mercure contenu dans un certain nombre n de divisions du tube capillaire. Représentant alors par N le nombre des divisions du petit tube contenues dans le réservoir, on a l'égalité $\frac{N}{n} = \frac{P}{p}$; d'où l'on tire la valeur de N.

Enfin, dans l'intérieur du cylindre, est un *manomètre à air comprimé*. On nomme ainsi un tube de verre B, plein d'air, dont

le bout supérieur est fermé, et dont le bout inférieur, qui est ouvert, plonge dans le bain de mercure qui se trouve au fond de l'appareil. Lorsqu'on n'exerce aucune pression sur l'eau qui remplit le cylindre, le tube B est complétement plein d'air; mais lorsqu'au moyen de la vis P et du piston, on comprime l'eau du cylindre, la pression se transmet au mercure qui s'élève dans le tube B en comprimant l'air qu'il contient. Une échelle graduée C, placée le long de ce tube, indique la réduction du volume de l'air, et c'est d'après cette réduction de volume qu'on apprécie la pression exercée sur le liquide contenu dans le cylindre, ainsi qu'il sera démontré en traitant du manomètre (154).

Cela posé, pour expérimenter avec le piézomètre, on commence par remplir le réservoir A du liquide à comprimer; puis, par l'entonnoir R, on remplit d'eau le cylindre. Tournant alors la vis P de manière à faire descendre le piston, celui-ci exerce une pression sur l'eau et le mercure qui sont dans l'appareil, et, par l'effet de cette pression, non-seulement le mercure s'élève dans le tube B, mais aussi dans le tube capillaire soudé au réservoir A, ainsi que le montre le dessin. Cette ascension du mercure dans le tube capillaire indique que le liquide renfermé dans le réservoir a diminué de volume, et donne la mesure de sa contraction, puisqu'on sait que le réservoir contient N des divisions graduées sur le tube capillaire.

Œrsted, dans ses expériences, avait supposé que la capacité du réservoir A demeurait invariable, ses parois étant également comprimées intérieurement et extérieurement par le liquide (80). Mais l'analyse mathématique prouve que ce volume diminue par l'effet des pressions extérieure et intérieure. C'est en tenant compte de ce changement de capacité que les expériences de Colladon et Sturm ont été faites. Ces savants ont ainsi constaté, pour une pression égale au poids de l'atmosphère, et à la température zéro, les contractions suivantes :

Mercure.....	5	millionièmes	du volume primitif.
Eau distillée non privée d'air.	49	—	—
Eau distillée privée d'air...	51	—	—
Éther sulfurique.....	133	—	—

Ils ont de plus observé, pour l'eau et le mercure, que, dans de certaines limites, le décroissement de volume est proportionnel à la pression.

Quelle que soit la compression à laquelle on ait soumis un

liquide, l'expérience fait voir qu'aussitôt que l'excès de pression cesse, le liquide revient exactement à son volume primitif; d'où l'on conclut que *les liquides sont parfaitement élastiques.*

80. **Principe d'égalité de pression, ou principe de Pascal.** — En regardant les liquides comme parfaitement élastiques, doués d'une fluidité parfaite, et en les supposant soustraits à l'action de la pesanteur, on a été conduit au principe suivant, connu sous le nom de *principe d'égalité de pression*, et aussi sous celui de *principe de Pascal*, parce qu'il a été posé pour la première fois par le célèbre écrivain et géomètre Blaise Pascal :

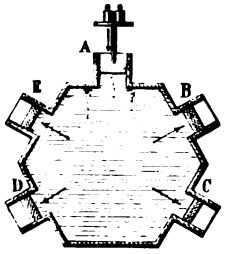


Fig. 36.

Une pression exercée en un point quelconque de la masse d'un liquide se transmet en tous sens avec la même intensité sur toute surface égale à celle qui reçoit la pression.

Pour nous rendre compte de ce principe, soit un vase de forme quelconque, sur les parois duquel sont placées diverses ouvertures cylindriques fermées par des pistons mobiles. Si, sur le piston supérieur A (fig. 36), on exerce, de dehors en dedans, une pression quelconque, de 20 kilogrammes, par exemple, instantanément, cette pression se transmet sur la face interne des pistons B, C...,

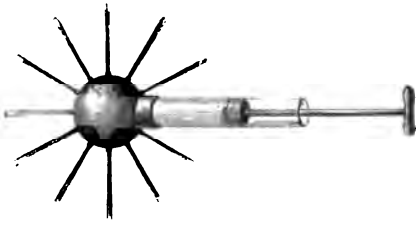


Fig. 37.

qui sont poussés de dedans en dehors par une pression 20, si leur surface égale celle du premier piston; mais pour des surfaces deux, trois fois plus grandes, la pression transmise est 40 ou 60 kilogrammes; c'est-à-dire qu'elle croît proportionnellement à la surface.

Le principe d'égalité de pression est généralement admis comme une conséquence de la constitution des liquides. On peut, par l'expérience suivante, démontrer que la pression se transmet, en effet, dans tous les sens; mais on ne démontre pas qu'elle se transmet également. Un cylindre, dans lequel se meut un piston (fig. 37), est terminé par une sphère creuse sur laquelle sont placés de petits ajutages cylindriques perpendiculaires à ses parois. La sphère et le cylindre étant remplis d'eau, on pousse le piston, et le liquide jaillit par tous les orifices et non pas seulement par celui qui est opposé au piston.

Si l'on ne peut donner une démonstration expérimentale satisfaisante du principe d'égalité de pression, cela tient à ce que, dans les expériences, on ne peut faire abstraction ni du poids des liquides, ni du frottement des pistons qui transmettent la pression.

PRESSIONS DÉVELOPPÉES DANS LES LIQUIDES PAR LA PESANTEUR.

81. **Pression verticale de haut en bas; ses lois.** — Un liquide quelconque étant en repos dans un vase, si on le suppose partagé en tranches horizontales d'égale épaisseur, il est évident que chacune supporte le poids des tranches qui sont au-dessus d'elle. L'action de la pesanteur fait donc naître, dans la masse du liquide, des pressions intérieures variables d'un point à un autre. Ces pressions sont soumises aux lois générales suivantes :

1° *La pression, sur chaque tranche, est proportionnelle à la profondeur.*

2° *Pour une même profondeur, dans des liquides différents, la pression est proportionnelle à la densité du liquide.*

3° *La pression est la même sur tous les points d'une même couche horizontale.*

Les deux premières lois peuvent être admises comme évidentes; la troisième est une conséquence de la première et du principe de Pascal.

82. **Pression verticale de bas en haut.** — La pression que les tranches supérieures d'un liquide exercent sur les tranches inférieures fait naître dans celles-ci, de bas en haut, une réaction égale et contraire, qui est une conséquence du principe de la transmission de pression en tous sens. Cette pression de bas en haut se désigne sous le nom de *poussée des liquides*. Elle est

très-sensible lorsqu'on plonge la main dans un liquide, surtout s'il a une grande densité, comme le mercure.

Pour la constater par l'expérience, on se sert d'un tube de verre A ouvert à ses deux extrémités (fig. 38). Après avoir appliqué contre l'extrémité inférieure un disque de verre O, qui sert d'obturateur, et qu'on soutient d'abord à l'aide d'un fil C, qui lui est fixé, on plonge le tout dans l'eau, puis on abandonne le fil à lui-même. L'obturateur reste alors appliqué contre le tube, ce qui indique déjà qu'il supporte, de bas en haut, une pression supérieure à son poids. Enfin, si l'on verse lentement de l'eau dans le tube, le disque supporte le poids de ce liquide, et il ne tombe qu'au moment où le niveau de l'eau, à l'intérieur, est le même qu'à l'extérieur, ce qui démontre que la pression de bas en haut, qui s'exerçait sur le disque, est égale au poids d'une colonne d'eau ayant pour base la section intérieure du tube A, et pour hauteur la distance verticale du disque à la surface supérieure du liquide dans lequel plonge le tube. On conclut de là que *la poussée des liquides, en un point quelconque de leur masse, est soumise aux trois mêmes lois que la pression verticale de haut en bas* (81).

Fig. 38 (h = 20).

83. **La pression est indépendante de la forme des vases.** — La pression exercée par un liquide, en vertu de son poids, sur un point quelconque de sa masse ou sur les parois du vase qui le contient, dépend, comme on l'a vu ci-dessus (81), de la profondeur et de la densité du liquide, mais *elle est indépendante de la forme du vase et de la quantité de liquide.*

Ce principe, qui est une conséquence du principe d'égalité de pression, peut se démontrer expérimentalement à l'aide de plusieurs appareils; celui dont l'usage est le plus répandu est le suivant, dû à de Haldat. Il se compose d'un tube coudé ABC (fig. 39), terminé, en A, par un robinet de cuivre sur lequel on peut visser successivement deux vases M et P, de même hauteur, mais de forme et de capacité différentes, le premier étant conique et le second à peu près cylindrique. Pour faire l'expérience, on commence par verser du mercure dans le tube ABC, de manière que son niveau n'atteigne pas tout à fait le robinet A. On visse

alors, sur le tube, le vase M, qu'on remplit d'eau ; celle-ci, par son poids, refoule le mercure et l'élève dans le tube C, où l'on repère son niveau au moyen d'une virole *a*, qui peut glisser le long

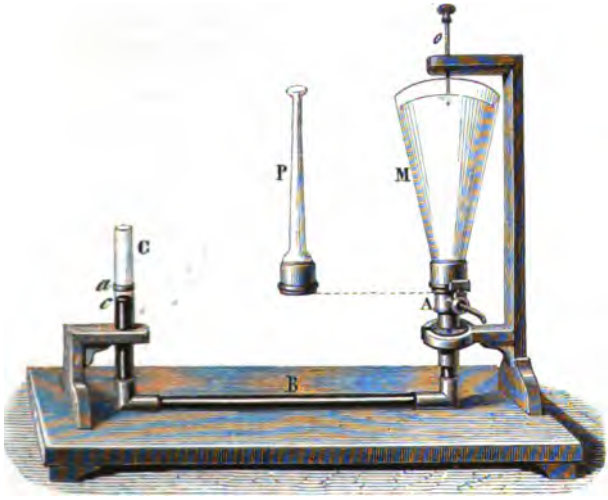


Fig. 39 (h = 72).

du tube. On marque de même le niveau de l'eau dans le vase M à l'aide d'une tige mobile *o* placée au-dessus. Cela fait, on vide le vase M au moyen du robinet, on le dévisse et on le remplace par le vase P. Versant enfin de l'eau dans celui-ci, on voit le mercure, qui avait repris son premier niveau dans les deux branches du tube ABC, s'élever de nouveau dans le tube C, et au moment où, dans le vase P, l'eau atteint la même hauteur qu'elle avait dans le vase M, ce qu'on reconnaît au moyen de la tige *o*, le mercure reprend dans le tube C le même niveau que dans le premier cas, ce qu'indique la virole *a*. On conclut de là que, dans les deux cas, la pression transmise au mercure dans la direction ABC est la même. Cette pression est donc indépendante de la forme du vase, et, par conséquent, de la quantité de liquide. Quant au fond du vase, il est évidemment le même dans les deux cas, c'est-à-dire la surface du mercure dans l'intérieur du tube A.

On conclut de là qu'avec une très-petite quantité de liquide on

peut produire des pressions considérables. Pour cela, il suffit de fixer, à la paroi d'un vase fermé et plein d'eau, un tube d'un petit diamètre et d'une grande hauteur. Ce tube étant rempli d'eau, la pression transmise sur la paroi du vase est égale au poids d'une colonne d'eau qui aurait pour base cette paroi et une hauteur égale à celle du tube. On peut donc la rendre aussi grande qu'on voudra. Pascal est parvenu ainsi, avec un simple filet d'eau de 10 mètres de hauteur, à faire éclater un tonneau solidement construit.

D'après le principe qui vient d'être démontré, on peut facilement calculer les pressions qui se produisent au fond des mers. En effet, il sera démontré bientôt que la pression de l'atmosphère équivaut à celle d'une colonne d'eau de 10 mètres. Or, les navigateurs ont souvent observé que la sonde n'atteignait pas le fond des mers à une profondeur de 4000 mètres. C'est donc une pression égale à plus de 400 fois celle de l'atmosphère qui s'exerce au fond de certaines mers.

84. **Pression sur les parois latérales.** — Les pressions que fait naître la pesanteur dans la masse des liquides se transmettant en tous sens, d'après le principe de Pascal, il en résulte, en chaque point des parois latérales, des pressions soumises aux lois données précédemment (81) et agissant toujours perpendiculairement à ces parois, quelle que soit leur forme ; car toute pression oblique à une paroi se décompose en deux forces, l'une perpendiculaire à la paroi et produisant seule une pression, l'autre parallèle et ne produisant aucun effet. C'est la résultante de toutes ces pressions qui représente la pression totale sur la paroi ; mais ces pressions croissant proportionnellement à la profondeur et aussi proportionnellement à l'étendue de la paroi dans le sens horizontal, leur résultante ne peut se trouver que par le calcul qui fait voir que la pression totale, sur une portion de paroi déterminée, *est égale au poids d'une colonne liquide qui aurait pour base cette portion de paroi et pour hauteur la distance verticale de son centre de gravité à la surface libre du liquide.*

Quant au point d'application de cette pression totale, point qu'on désigne sous le nom de *centre de pression*, il est toujours un peu au-dessous du centre de gravité de la paroi. En effet, si les pressions exercées sur les différents points de la paroi étaient égales entre elles, il est évident que le point d'application de leur résultante, c'est-à-dire le centre de pression, coïnciderait avec le centre de gravité de cette paroi ; mais comme ces pressions croissent avec la profondeur, le centre de pression se trouve nécessairement

abaissé au-dessous du centre de gravité. La position de ce point se détermine par le calcul, qui conduit aux résultats suivants : 1° sur une paroi rectangulaire, dont le bord supérieur est à fleur d'eau, le centre de pression est situé, du haut en bas, aux $\frac{2}{3}$ de la ligne qui joint les milieux des côtés horizontaux ; 2° sur une paroi triangulaire dont la base est horizontale et à fleur d'eau, le centre de pression est au milieu de la ligne qui joint le sommet du triangle avec le milieu de cette base ; 3° si, la paroi étant encore triangulaire, le sommet est à fleur d'eau et la base horizontale, le centre de pression se trouve sur la ligne qui joint le milieu de cette base au sommet, et aux $\frac{3}{4}$ à partir de ce point.

Fig. 40 (h = 62).

85. **Tourniquet hydraulique.** — Lorsqu'un liquide est en équilibre dans un vase, il se produit sur les parois opposées, suivant chaque tranche horizontale, des pressions égales et contraires deux à deux, qui se détruisent, en sorte que rien n'indique alors l'existence de ces pressions ; mais on les constate au moyen du *tourniquet hydraulique*. Cet appareil se compose d'un vase de verre M (fig. 40) qui repose sur un pivot, de manière à pouvoir tourner librement autour d'un axe vertical. Ce vase porte, à sa partie inférieure, perpendiculairement à son axe, un tube de cuivre C, coudé horizontalement et en sens contraire à ses deux extrémités. L'appareil étant rempli d'eau, il en résulte, sur les parois du tube inférieur, des pressions intérieures qui se détruiraient comme égales et contraires deux à deux, si le tube était complétement fermé. Mais celui-ci étant ouvert à ses deux extrémités, le liquide s'écoule, et dès lors la pression ne s'exerce plus aux orifices ouverts, mais seulement sur la portion de paroi opposée A, ainsi qu'il est représenté sur la droite du dessin. La pression qui s'exerce en A n'étant plus équilibrée par la pression opposée, imprime au tube et à tout

l'appareil un mouvement de rotation dans le sens de la flèche A, mouvement qui est d'autant plus rapide que la hauteur du liquide, dans le vase, est plus glus grande, et que la section des orifices de sortie présente plus de surface.

Les pressions latérales ont reçu une importante application dans les moteurs hydrauliques connus sous le nom de *roues à réaction*.

86. **Paradoxe hydrostatique.** — On a vu ci-dessus (83) que la pression sur le fond d'un vase plein de liquide ne dépend ni de la forme du vase ni de la quantité de liquide, mais seulement de la hauteur de celui-ci au-dessus du fond. Or, on ne doit pas confondre la pression ainsi exercée sur le fond avec celle que le vase lui-même exerce sur le corps qui lui sert de support. Cette dernière est toujours égale au poids total du vase et du liquide qu'il contient, tandis que la première peut être plus grande que ce poids, plus petite ou égale, suivant la forme du vase. On désigne ordinairement ce fait sous le nom de *paradoxe hydrostatique*, parce que, au premier abord, il semble paradoxal.

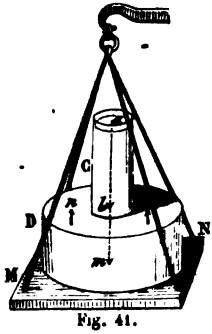


Fig. 41.

Pour s'en rendre compte, soit un vase CD (fig. 41), formé de deux pièces cylindriques d'inégal diamètre, et rempli d'eau jusqu'en *a*. D'après le principe que la pression sur le fond d'un vase est indépendante de la forme du vase, le fond du vase CD supporte la même pression que si son diamètre était partout le même que celui de sa partie inférieure; d'où il semble résulter que le vase CD étant placé dans un plateau de balance MN, celle-ci devrait accuser le même poids que si l'on plaçait dans le plateau un vase cylindrique contenant la même hauteur d'eau et ayant, dans toute sa hauteur, le diamètre de la partie D. Mais il est facile de voir que la pression exercée par le liquide, sur le fond du vase, ne se transmet pas tout entière sur le plateau MN. En effet, d'après le principe de Pascal, la pression due à la colonne d'eau *ab* se transmettant de bas en haut, dans l'intérieur du vase, sur la paroi *no*, il en résulte une pression de sens contraire à celle qui s'exerce en *m*, laquelle fait équilibre à une partie de cette dernière et réduit la pression, sur le plateau MN, seulement au poids du vase CD et à celui de l'eau qu'il contient.

CONDITIONS D'ÉQUILIBRE DES LIQUIDES.

87. **Équilibre d'un liquide dans un seul vase.** — Pour qu'un liquide demeure en équilibre dans un vase de forme quelconque, il doit satisfaire aux deux conditions suivantes :

1° *Sa surface, en chaque point, doit être perpendiculaire à la direction de la résultante des forces qui sollicitent les molécules du liquide.*

2° *Une molécule quelconque, prise dans la masse, doit éprouver, en tous sens, des pressions égales et contraires.*

La deuxième condition est évidente d'elle-même; car si, dans deux directions opposées, les pressions qui s'exercent sur une molécule quelconque n'étaient pas égales et contraires, la molécule serait entraînée dans le sens de la plus grande pression, et il n'y aurait pas équilibre. Cette seconde condition est, du reste, une conséquence du principe d'égalité de pression et de la réaction que toute pression fait naître dans la masse des liquides (82).

Fig. 42.

Pour démontrer que la première condition est nécessaire, supposons que *mp* représentant la direction de la résultante des forces qui sollicitent une molécule quelconque *m* de la surface (fig. 42), cette surface soit inclinée par rapport à la force *mp*. Celle-ci pourra alors se décomposer en deux forces *mq* et *mf* (28) : l'une perpendiculaire à la surface du liquide, l'autre à la direction *mp*. Or, la première sera détruite par la résistance du liquide, tandis que la seconde entraînera la molécule dans la direction *mf*, ce qui démontre que l'équilibre est impossible.

Si la force qui sollicite le liquide est la pesanteur, la direction *mp* est verticale, et alors, pour qu'il y ait équilibre, la surface libre du liquide doit être plane et horizontale (38), du moins si le liquide est contenu dans un vase ou un bassin d'une petite étendue, puisqu'en chaque point la direction de la pesanteur est alors la même. Mais il n'en est plus ainsi pour une surface liquide d'une grande étendue, comme celle des mers. En effet, cette surface devant être, en chaque lieu, perpendiculaire à la direction de la pesanteur, et celle-ci changeant d'un lieu à un autre, en se dirigeant toujours sensiblement vers le centre de la terre, il en résulte que la surface

des mers change de direction en même temps que la pesanteur, et prend une forme sensiblement sphérique.

Pour prouver expérimentalement que le fil à plomb, en chaque lieu, est perpendiculaire à la surface des liquides en équilibre, tenant le fil à plomb à la main, comme dans la figure 8, on en fait plonger la boule dans un vase rempli d'eau, et on aperçoit alors dans l'eau une image du fil exactement en ligne droite avec lui, ce qui n'aurait pas lieu s'il n'était pas perpendiculaire à la surface du liquide.

88. **Équilibre d'un même liquide dans plusieurs vases communiquants.** — Lorsque plusieurs vases de forme quelconque et contenant le même liquide communiquent entre eux, il n'y a équilibre qu'autant que le liquide, dans chaque vase, satisfait aux deux conditions précédentes (87), et, de plus, *que les diverses surfaces libres du liquide, dans tous les vases, sont situées dans un même plan horizontal.*

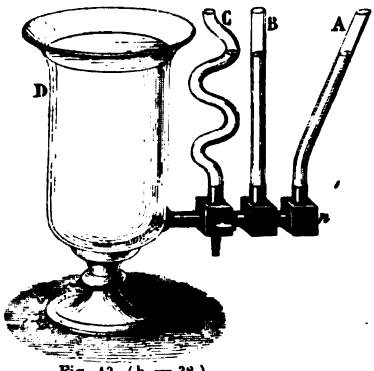


Fig. 43. (h = 38).

Soient, en effet, différents vases A, B, C, D, communiquant entre eux (fig. 43); si l'on conçoit, dans le tube de communication *mn*, une tranche liquide verticale, cette tranche ne pourra demeurer en équilibre qu'autant que les pressions qu'elle supporte de *m* vers *n* et de *n* vers *m* sont égales et contraires. Mais on a vu (84) que ces pressions sont respectivement équivalentes au poids d'une colonne d'eau qui aurait pour base la tranche que nous considérons, et pour hauteur la distance verticale de son centre de gravité à la surface libre du liquide. Si l'on conçoit donc un plan horizontal *mn* mené par le centre de gravité de cette tranche, on voit que l'équilibre ne peut exister qu'autant que la hauteur du liquide, au-dessus de ce plan, est la même dans chaque vase, ce qui démontre le principe énoncé.

89. **Équilibre des liquides superposés.** — Lorsque plusieurs liquides hétérogènes sont superposés dans un même vase, il faut, pour qu'il y ait équilibre, que chacun d'eux satisfasse aux condi-

tions nécessaires dans le cas d'un seul liquide (87); mais, de plus, ***pour que l'équilibre soit stable, les liquides doivent être superposés par ordre de densités décroissantes de bas en haut.***

Cette dernière condition se démontre expérimentalement au moyen de la ***fiole des quatre éléments.*** On nomme ainsi un flacon long et étroit, contenant du mercure, de l'eau saturée de carbonate de potasse, de l'alcool coloré en rouge, et de l'huile de naphte. Lorsqu'on agite le flacon, les quatre liquides se mélangent; mais aussitôt qu'on le maintient au repos, le mercure, qui est le plus dense, se précipite au fond; puis, au-dessus du mercure, se déposent successivement l'eau, l'alcool et l'huile de naphte. Tel est, en effet, l'ordre des densités décroissantes de ces corps. C'est afin que l'eau ne se mêle pas à l'alcool qu'on la sature de carbonate de potasse, ce sel n'étant pas soluble dans l'alcool.

Fig. 44 (h = 72).

Il faut rapporter la séparation des liquides, dans l'expérience précédente, à la même cause qui fait que les solides plongés dans un liquide plus dense qu'eux viennent flotter à sa surface (98).

C'est en vertu du principe d'hydrostatique que nous venons de faire connaître, que l'eau douce, à l'embouchure des fleuves, surnage assez longtemps au-dessus de l'eau salée de la mer. C'est par la même cause que la crème, qui est moins dense que le lait, s'en sépare peu à peu pour se rendre à la surface.

90. Équilibre de deux liquides hétérogènes dans deux vases communiquants. — Lorsque deux liquides, de densités différentes et sans action chimique l'un sur l'autre, sont contenus dans deux vases communiquants, aux conditions déjà connues d'équilibre (87) il faut ajouter celle-ci, que ***les hauteurs des colonnes liquides qui se font équilibre doivent être en raison inverse des densités des deux liquides.***

Pour démontrer ce principe par l'expérience, on prend un tube de verre ***mn***, recourbé et fixé sur une planchette verticale (fig. 44), on y verse du mercure; puis, dans une des branches AB, on verse de l'eau. La colonne d'eau AB exerçant en B une pression sur le

mercure, le niveau de celui-ci baisse dans la branche AB et s'élève dans l'autre d'une quantité CD ; en sorte que, l'équilibre étant établi, si l'on conçoit en B un plan horizontal BC, la colonne d'eau AB fait équilibre à la colonne de mercure DC. Mesurant alors les hauteurs DC et AB, au moyen de deux échelles fixées parallèlement aux branches du tube, on trouve que la première est 13 fois et demie plus petite que AB. Or, on verra bientôt que la densité du mercure est 13 fois et demie celle de l'eau; donc les hauteurs sont bien en raison inverse des densités. On conçoit, en effet, que les pressions sur une même tranche horizontale BC devant être les mêmes, ce résultat ne peut se réaliser qu'autant qu'on gagne en hauteur ce qu'on perd en densité.

On peut déduire le principe précédent d'un calcul fort simple. Pour cela, soient d et d' les densités de l'eau et du mercure, h et h' les hauteurs de ces liquides qui se font équilibre, enfin, soit g l'intensité de la gravité. La pression en B étant proportionnelle à la densité du liquide qui est au-dessus, à sa hauteur et à l'intensité de la gravité, cette pression a pour mesure le produit dhg. Par la même raison, la pression qui s'exerce en C a pour mesure $d'h'g$. Mais lorsqu'il y a équilibre, ces pressions sont égales; on a donc $dhg = d'h'g$, ou $dh = d'h'$, en supprimant le facteur commun g. Or, cette dernière égalité n'est autre chose que l'expression du principe qu'il s'agissait de démontrer, car les deux produits dh et $d'h'$ devant toujours rester égaux entre eux, il s'ensuit que plus d' sera grand par rapport à d, plus h' sera petit par rapport à h.

Ce principe d'hydrostatique peut servir à déterminer la densité d'un liquide. En effet, supposons que l'une des branches du tube précédent contenant de l'eau et l'autre de l'huile, les hauteurs respectives des colonnes liquides qui se font équilibre, soient 38 centimètres pour l'huile et 35 pour l'eau. La densité de l'eau étant prise pour unité, si l'on représente par x celle de l'huile, on a

$$38 \times x = 35 \times 1 ; \text{ d'où } x = \frac{35}{38} = 0,92.$$

APPLICATIONS DES PRINCIPES D'HYDROSTATIQUE QUI PRÉCÈDENT.

91. **Presse hydraulique.** — Le principe d'égalité de pression (80) a reçu une importante application dans la *presse hydraulique*, dont le principe est dû à Pascal, mais qui a été construite, pour la première fois, à Londres, en 1796, par Bramah.

Cet appareil, à l'aide duquel on peut produire des pressions énormes, se compose d'un corps de pompe B, à parois très-résis-

tantes (fig. 45). Dans ce corps de pompe monte et descend, à frottement doux, un long cylindre P, en fonte, faisant l'office de piston, mais ne touchant les parois du corps de pompe qu'à leur partie supérieure. Le piston P porte un plateau de fonte, qui monte et descend avec lui, étant guidé dans sa course par quatre colonnes

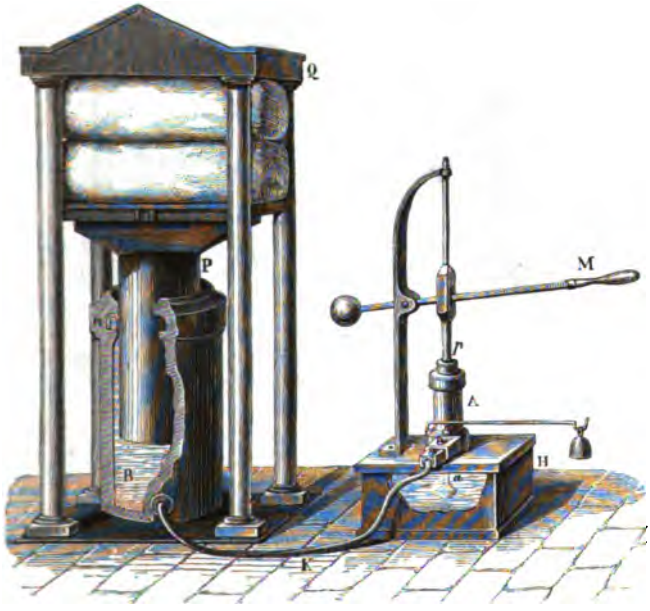


Fig. 45 (h = 2m).

de même métal sur lesquelles il s'emboîte à chacun de ses angles. Ces colonnes supportent elles-mêmes un second plateau Q, qui est fixe; c'est entre ce dernier et le plateau mobile que sont comprimés les objets sur lesquels on opère.

Quant à l'ascension du piston P, elle s'obtient de la manière suivante : le corps de pompe B étant rempli d'eau, la pression y est transmise à l'aide d'une pompe foulante A, qu'on nomme la *pompe d'injection*, et qui est en communication avec le corps de pompe B par un tuyau de plomb K. La pompe A marche à l'aide d'un levier M. Lorsque son piston *p* monte, le vide se fait en dessous, et l'eau contenue dans le réservoir H est aspirée par un

tuyau *a*, terminé par une pomme d'arrosoir destinée à arrêter les corps étrangers qui peuvent se rencontrer dans l'eau. Quand ensuite le piston *p* redescend, il refoule l'eau dans le corps de pompe B par le tuyau K.

La figure 46 représente, en coupe et sur une plus grande échelle, le système de soupapes nécessaires à la manœuvre de l'appareil. La soupape *c* s'ouvre quand le piston *p* s'élève, et se ferme lorsqu'il descend. Mais alors la soupape *o* est soulevée par la pression de

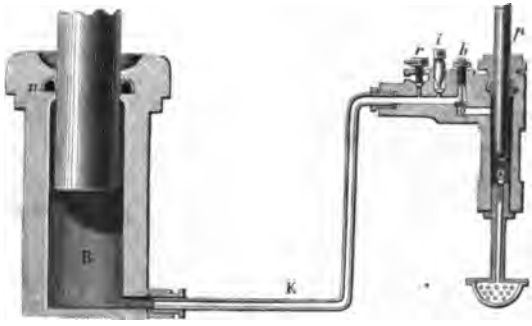


Fig. 46.

l'eau, laquelle passe ensuite dans le conduit K. La soupape *i* est une ***soupape de sûreté***, maintenue par un poids qui agit sur elle à l'aide d'un levier (fig. 45). En la chargeant plus ou moins, on est maître de limiter la pression ; car aussitôt qu'elle supporte de bas en haut une pression plus grande que sa charge, elle se soulève et laisse échapper l'eau. Une vis *r*, qu'on desserre à volonté, sert à opérer la dépression, en livrant passage à l'eau pour retourner du corps de pompe B dans le réservoir H. Enfin, lorsqu'on veut conserver des objets en presse pendant quelque temps, on serre une vis *h* qui ferme la soupape *o*.

Il est encore une pièce qui mérite d'être décrite ; c'est le ***cuir embouti***. On nomme ainsi un cuir épais, imbibé d'huile et imperméable à l'eau, lequel sert à fermer hermétiquement le corps de pompe B. Ce cuir, qui est recourbé sous la forme d'un U renversé, s'enroule circulairement dans une cavité *n* pratiquée au haut de la paroi du corps de pompe. Plus l'eau est comprimée dans celui-ci, plus ce cuir s'applique fortement, d'un côté sur la paroi du corps de pompe, de l'autre sur le piston P, de manière à s'opposer à toute fuite.

La pression qu'on peut obtenir au moyen de la presse hydraulique dépend du rapport de la section du piston P à celle du piston *p*. Si la première est 50 ou 100 fois plus grande que la seconde, la pression supportée de bas en haut par le grand piston sera 50 ou 100 fois celle exercée par le petit. De plus, on gagne encore par le levier M. Si, par exemple, le bras de levier de la puissance égale cinq fois le levier de la résistance, on gagne 5 fois en force (45). Si donc un homme exerce en M un effort de 30^k, l'effet transmis par le piston *p* sera de 150^k, et celui que transmettra le piston P sera 15000^k, en supposant sa section égale à 100 fois celle du petit.

Il est à observer que plus le diamètre du piston P sera grand par rapport à celui du piston *p*, plus la course du premier sera lente par rapport à celle du second, c'est-à-dire que *ce qu'on gagne en force on le perd en vitesse*. C'est là, en effet, un principe général de mécanique qui se retrouve dans toutes les machines.

La presse hydraulique est utilisée dans tous les travaux qui nécessitent de grandes pressions. On l'emploie pour fouler les draps, pour extraire le suc des betteraves, l'huile des graines oléagineuses. Elle sert aussi à éprouver les canons, les chaudières à vapeur et les chaînes destinées à la marine.

92. Niveau d'eau. — Le *niveau d'eau* est une application des conditions d'équilibre dans les vases communiquants (88). Il se compose d'un tube de fer-blanc ou de laiton, coudé à ses deux extrémités; à celles-ci sont adaptés deux tubes de verre D et E (fig. 47). Pour se servir de cet appareil, on le dispose horizontalement sur un pied à trois branches, et on y verse de l'eau jusqu'à ce que le liquide s'élève dans les deux tubes de verre. L'équilibre étant établi, le niveau de l'eau dans ces deux tubes est le même, c'est-à-dire que les surfaces du liquide en D et E sont dans un même plan horizontal.

Cet instrument sert à prendre des nivellements, c'est-à-dire à déterminer de combien un point est plus élevé qu'un autre. Par exemple, si l'on veut trouver de combien un point B du sol est au-dessus d'un autre point A, on place en ce dernier point une *mire*. On nomme ainsi une règle de bois formée de deux tiges à coulisse et terminée par une plaque M de fer-blanc, qu'on nomme le *voyant*, et qui porte à son centre un point de repère. Cette mire étant disposée verticalement en A, un observateur, placé près du niveau, dirige, par les surfaces D et E, un rayon visuel vers la

mire, et fait signe à un aide, qui la tient, de l'allonger ou de la raccourcir jusqu'à ce que le point de repère se trouve sur le prolongement de la ligne DE. Mesurant alors la hauteur AM, et en

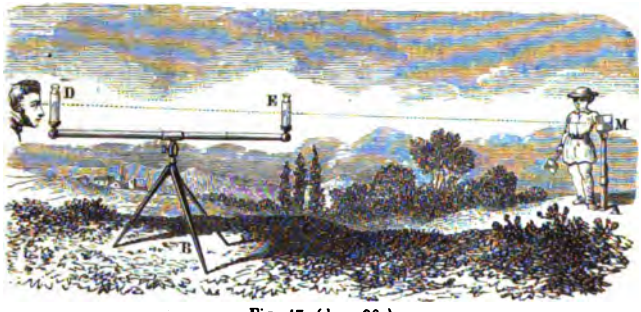


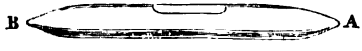
Fig. 47. (l = 90.)

soustrayant la hauteur du niveau au-dessus du sol, on connaît de combien le point B est élevé au-dessus du point A.

Le niveau déterminé de la sorte est le *niveau apparent*, c'est-à-dire celui qui correspond à des points contenus dans un plan tangent à la surface du globe supposé parfaitement sphérique. Le *niveau vrai* est celui qui correspond à des points également distants du centre de la terre. Ce n'est que pour de faibles distances que le niveau apparent peut être pris pour le niveau vrai.

93. **Niveau à bulle d'air.** — Le *niveau à bulle d'air* est plus

Fig. 48.



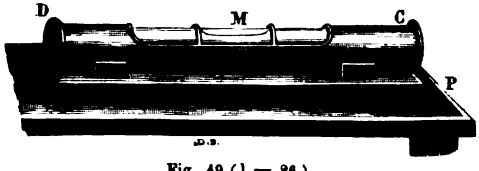


Fig. 49 (l = 26).

sensible et plus précis que le niveau d'eau. Il consiste simplement en un tube de verre AB (fig. 48) très-légèrement courbé, qu'on remplit d'eau, en y conservant seulement une petite bulle d'air qui

tend toujours à occuper la partie la plus élevée (89). Ce tube, étant soudé à la lampe, à ses deux extrémités, est renfermé dans un étui de cuivre CD (fig. 49). Celui-ci est fixé sur un support de même métal, lequel est dressé avec soin, de manière que lorsqu'il repose sur un plan horizontal P, la bulle d'air M s'arrête exactement entre deux points de repère marqués sur l'étui.

Pour prendre des nivellements avec cet appareil, on le fixe à une lunette dont il sert à indiquer les positions horizontales.

* 94. **Cours d'eau, puits artésiens.** — Les lacs, les mers, les sources, les rivières, sont autant de vases communiquants dans lesquels les eaux tendent sans cesse à prendre un niveau vrai (92).

Il en est de même des *puits artésiens*, ainsi nommés parce que c'est dans l'ancienne province d'Artois qu'ils ont d'abord été pra-

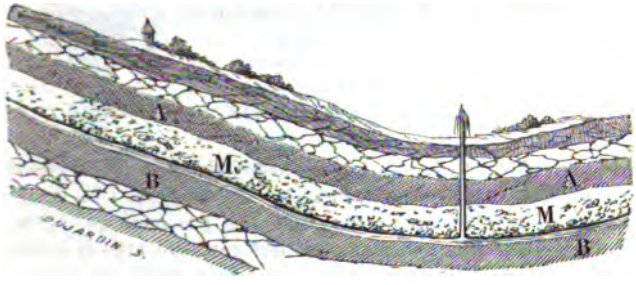


Fig. 50.

tiqués. On y en rencontre dont l'origine paraît remonter à la fin du XIIe siècle. A une époque beaucoup plus reculée, des puits de ce genre ont été construits en Chine et en Égypte.

Ces puits sont des trous très-étroits, forés à la sonde, et d'une profondeur très-variable. Les eaux sont généralement jaillissantes. Pour en comprendre la théorie, il faut remarquer que les terrains qui composent l'écorce du globe sont, les uns perméables aux eaux, comme les sables, les graviers; les autres imperméables, comme les argiles. Cela posé, soit un bassin géographique plus ou moins étendu, au-dessous duquel se rencontrent deux couches imperméables AA, BB (fig. 50), comprenant entre elles une couche perméable MM. Supposons, enfin, cette dernière en communication avec les terrains plus élevés, à travers lesquels s'infiltre l'eau des pluies. Celle-ci, suivant la pente naturelle du terrain, à travers la couche perméable, se rend au-dessous du bassin géographique

que nous avons supposé, sans pouvoir communiquer avec lui, en étant séparée par la couche imperméable AA. Mais si, à partir du sol, on pratique un trou qui perce cette couche, les eaux, tendant toujours à se mettre de niveau, s'élèvent dans ce trou à une hauteur d'autant plus grande qu'elles communiquent avec un terrain plus élevé.

Les eaux qui alimentent les puits artésiens viennent souvent de 20 à 30 lieues. Quant à la profondeur, elle varie avec les localités. Le puits foré de Grenelle a 548 mètres de profondeur. Il donne 3000 litres par minute. C'est un des plus abondants et des plus profonds qu'on ait percés. L'eau qui s'en dégage est, en toute saison, à 27°. D'après la loi de l'accroissement de la température des couches terrestres quand on s'abaisse au-dessous du niveau du sol (382), il suffirait que la profondeur de ce puits eût 150 mètres de plus pour que ses eaux sortissent, toute l'année, à 32°, c'est-à-dire à la température ordinaire des bains.

CORPS PLONGÉS DANS LES LIQUIDES.

95. **Pressions supportées par un corps plongé dans un liquide.** — Lorsqu'un corps solide est entièrement plongé dans un liquide, sa surface supporte, en chaque point, des pressions qui lui sont respectivement perpendiculaires et qui croissent avec la profondeur. Si l'on conçoit toutes ces pressions décomposées en pressions horizontales et en pressions verticales, les premières, pour chaque tranche horizontale, sont égales et contraires deux à deux, et, par conséquent, se font équilibre. Quant aux pressions verticales, il est facile de voir qu'elles sont inégales et qu'elles tendent à mouvoir de bas en haut le corps immergé.

Soit, en effet, un cube plongé au milieu d'une masse d'eau (fig. 51), et supposons, pour plus de simplicité, ses parois latérales disposées verticalement. Ces parois supportent des pressions égales, puisqu'elles présentent la même surface et sont à la même profondeur (84). Pour deux faces opposées, il est d'ailleurs évident que les pressions sont de directions contraires; donc elles se font équilibre. Si nous considérons actuellement les pressions qui s'exercent sur les faces horizontales A et B, nous voyons que la première est pressée de haut en bas par le poids d'une colonne d'eau qui aurait pour base la face même et pour hauteur AD (84); de même, la face inférieure est poussée de bas en haut par le poids

d'une colonne d'eau qui aurait pour base cette face et pour hauteur BD (82). Le cube tend donc à être soulevé par la différence de ces deux pressions, laquelle est évidemment égale au poids d'une colonne d'eau qui aurait même base et même hauteur que le cube; par conséquent, *cette pression équivaut au poids même du volume d'eau déplacé par le corps immergé.*

On peut encore reconnaître, par le raisonnement suivant, que tout corps immergé dans un liquide supporte, de bas en haut, une poussée égale au poids du liquide qu'il déplace. En effet, dans une masse liquide en équilibre, considérons une portion de liquide d'une forme quelconque, sphérique, ovoïde, ou irrégulière, et supposons-la solidifiée, sans accroissement ni diminution de volume. Il est évident que la partie ainsi solidifiée supportera, de la part de la masse liquide, les mêmes pressions qu'auparavant, et que, par conséquent, elle sera encore en équilibre; ce qui ne peut avoir lieu que parce qu'elle supporte, de bas en haut, une poussée égale à son poids. Or, si à la place de la partie solidifiée on imagine un corps d'une autre substance, mais exactement de même volume et de même forme, ce corps supportera nécessairement les mêmes pressions que supportait le liquide solidifié, et dès lors il sera soumis, lui aussi, à une poussée égale au poids du liquide déplacé.

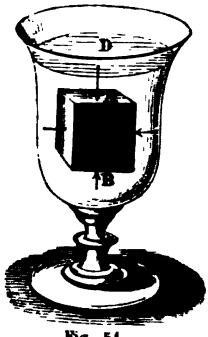


Fig. 51.

96. **Principe d'Archimède.** — D'après ce qui précède, tout corps plongé dans un liquide est soumis à l'action de deux forces opposées : la pesanteur, qui tend à l'abaisser, et la poussée du liquide, qui tend à le soulever avec un effort égal au poids même du liquide que déplace le corps. Le poids de celui-ci est donc détruit en totalité ou en partie par cette poussée, d'où l'on conclut qu'*un corps plongé dans un liquide perd une partie de son poids égale au poids du liquide déplacé.*

Ce principe, qui sert de base à la théorie des corps plongés et des corps flottants, est connu sous le nom de *principe d'Archimède*, parce qu'il fut découvert par ce célèbre géomètre, mort à Syracuse 212 ans avant l'ère chrétienne.

Le principe d'Archimède se démontre par l'expérience au moyen de la *balance hydrostatique*, laquelle est une balance ordinaire

dont chaque plateau est muni d'un crochet, et dont le fléau peut s'élever, à volonté, à l'aide d'une crémaillère qu'on fait marcher au moyen d'un petit pignon C (fig. 52). Un encliquetage D retient la crémaillère lorsqu'on l'a soulevée. Le fléau étant remonté, on

Fig. 52 (h = 60).

suspend, au-dessous de l'un des plateaux, un cylindre creux A, en cuivre, et, au-dessous de celui-ci, un cylindre plein B, dont le volume est exactement le même que la capacité du premier ; puis, dans l'autre plateau, on place des poids jusqu'à ce que l'équilibre s'établisse. Si alors on remplit d'eau le cylindre A, l'équilibre est rompu ; mais si l'on abaisse en même temps le fléau de manière que le cylindre B plonge en entier dans l'eau d'un vase placé au-dessous, on voit l'équilibre se rétablir. Le cylindre B perd donc, par son immersion, une partie de son poids égale au poids de l'eau

versée dans le cylindre A. Or, le principe d'Archimède se trouve ainsi démontré, puisque la capacité de ce dernier cylindre est précisément égale au volume du cylindre B.

97. **Détermination du volume d'un corps.** — Le principe d'Archimède donne le moyen d'obtenir, avec précision, le volume d'un corps de la forme la plus irrégulière, lorsqu'il n'est pas soluble dans l'eau. Pour cela, on le suspend, par un fil délié, à la balance hydrostatique, et on le pèse d'abord dans l'air, puis dans l'eau distillée et à 4°. La perte de poids que l'on constate alors est le poids de l'eau déplacée. Du poids de cette eau on déduit son volume, et, par suite, celui du corps immergé, qui est évidemment le même. Soit, par exemple, 155 grammes la perte de poids. Cela indique que l'eau déplacée pèse 155 grammes; mais on sait que le gramme est le poids d'un centimètre cube d'eau distillée et à 4°; donc le volume de l'eau deplacée, et, par conséquent, celui du corps plongé, est de 155 centimètres cubes.

98. **Équilibre des corps immergés et des corps flottants.** — D'après les considérations théoriques qui nous ont conduits au principe d'Archimède (95 et 96), si un corps plongé dans un liquide a la même densité que lui, la poussée qui tend à soulever ce corps est égale à son propre poids. Le corps reste donc en suspension dans le sein du liquide.

Mais si le corps est plus dense que le liquide, il tombe, car son poids l'emporte sur la poussée de bas en haut.

Enfin, si le corps immergé est moins dense que le liquide, c'est la poussée de celui-ci qui prédomine. Le corps prend donc un mouvement ascensionnel et s'élève hors du liquide jusqu'à ce qu'il n'en déplace qu'un volume d'un poids égal au sien. On dit alors que le corps *flotte*. La cire, le bois et tous les corps plus légers que l'eau, flottent à sa surface.

Pour que les corps, soit plongés, soit flottants, prennent un état d'équilibre stable, il faut : 1° *qu'ils déplacent un poids de liquide égal au leur ;* 2° *que leur centre de gravité soit au-dessous du centre de pression* (84) *et sur la même verticale.* En effet, soient c le centre de pression et g le centre de gravité d'un corps flottant (fig. 53); si les deux conditions ci-dessus sont satisfaites, les forces appliquées en c et en g, étant égales et contraires, se détruisent, et il y a équilibre. De plus, cet équilibre est stable, car si le corps est incliné, comme le montre la figure 54, les forces appliquées en c et en g tendent évidemment à le ramener à la position verticale. Mais si le centre de pression est au-dessous du centre de

gravité, il ne peut y avoir qu'un équilibre instable lorsque les points *g* et *c* sont sur la même verticale, car aussitôt que le corps est incliné (fig. 55), les actions des deux forces concourent pour le faire chavirer et le ramener à sa première position (fig. 53). Cependant, on démontre, en mécanique, qu'il peut encore y avoir équilibre stable quand le centre de pression se trouve plus bas que le centre de gravité. Mais il faut alors que celui-ci soit au-dessous d'un certain point qu'on nomme *métacentre*, et qui se détermine par le calcul. La connaissance de ces points est d'une haute importance dans l'arrimage des navires, car c'est de leur position relative que dépend la stabilité.

D'après le principe d'Archimède, les corps flottent d'autant plus

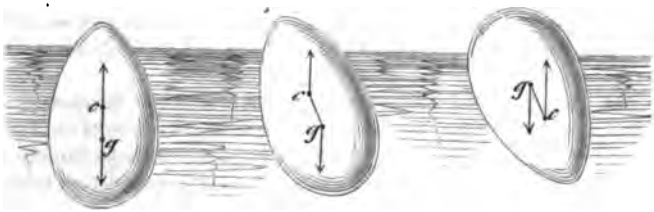


Fig. 53. Fig. 54. Fig. 55.

facilement à la surface des liquides, que ceux-ci sont relativement plus denses. Qu'on mette, par exemple, un œuf dans de l'eau ordinaire, il va au fond, parce qu'à volume égal il pèse davantage; mais qu'on le plonge dans de l'eau saturée de sel, il surnage. Un morceau de chêne flotte sur l'eau, mais il est submergé dans l'huile. Une masse de fer surnage dans un bain de mercure; dans l'eau, elle va au fond immédiatement. Quant au volume de la partie immergée, dans les corps flottants, il est en raison inverse de la densité du liquide, et en raison directe de celle du corps flottant.

99. **Ludion.** — Les effets divers de suspension, d'immersion et de flottaison dans un liquide, sont reproduits dans le petit appareil qu'on nomme *ludion*. Il se compose d'une éprouvette de verre remplie d'eau, en partie, et surmontée d'un tube de cuivre dans lequel est un piston qu'on fait marcher avec la main, et qui ferme hermétiquement (fig. 56). Dans le liquide est une petite figure en émail, soutenue par une boule de verre creuse *a*, qui contient de l'air et de l'eau, et flotte à sa surface. Cette boule est percée, à sa partie inférieure, d'une petite ouverture par laquelle l'eau peut pénétrer ou sortir, selon que l'air intérieur de la boule est plus ou

moins comprimé. La quantité d'eau préalablement introduite dans la boule est telle, que l'appareil n'a besoin que d'un très-petit excès de poids pour s'immerger tout à fait. Si l'on exerce donc avec la main une légère pression sur le piston, comme le montre la figure 56, l'air qui est au-dessous se trouve comprimé, et transmet sa pression à l'eau du vase et à l'air qui est dans la boule. Il en résulte qu'une certaine quantité d'eau pénètre dans celle-ci, et que le corps flottant, rendu plus lourd, s'immerge. Si l'on cesse alors la pression, l'air de la boule se détend, chasse l'excès d'eau qui y a pénétré, et le corps immergé, devenu plus léger, flotte de nouveau.

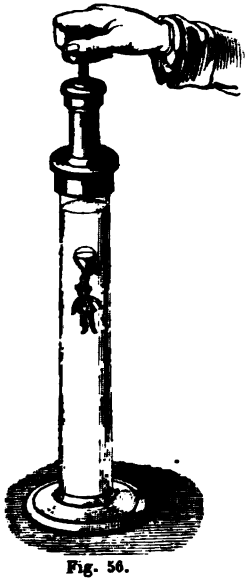


Fig. 56.

100. **Vessie natatoire des poissons.** — Chez les poissons, un grand nombre d'espèces portent dans l'abdomen, au-dessous de l'épine dorsale, une vessie pleine d'air qu'on nomme *vessie natatoire*. Le poisson, en la comprimant ou en la dilatant par un effort musculaire, fait varier son volume, et produit des effets analogues à ceux qu'on vient d'observer dans le ludion; c'est-à-dire qu'il s'abaisse ou s'élève, à volonté, au sein des eaux.

101. **Natation.** — Le corps humain, à volume égal, est généralement plus léger que l'eau douce : aussi peut-il flotter naturellement sur ce liquide, et mieux encore sur l'eau salée de la mer, qui est plus dense. La difficulté de la natation est donc moins de se maintenir à la surface de l'eau que de pouvoir tenir la tête hors du liquide, afin de respirer librement. Or, chez l'homme, la tête ayant un grand poids par rapport aux membres inférieurs, elle tend à plonger : c'est ce qui fait que la natation est pour l'homme un art qu'il doit cultiver. Chez les quadrupèdes, au contraire, la tête pesant moins que la partie postérieure du corps, peut demeurer sans effort hors de l'eau : aussi ces animaux nagent-ils naturellement.

POIDS SPÉCIFIQUES, ARÉOMÈTRES A VOLUME CONSTANT.

102. **Détermination des poids spécifiques.** — On a déjà vu (41) que le poids spécifique d'un corps, soit solide, soit liquide, est un nombre qui exprime combien ce corps pèse, à volume égal, comparativement à l'eau distillée et prise à la température de 4 degrés. D'après cette définition, pour calculer le poids spécifique d'un corps, il suffit de déterminer son poids et celui d'un égal volume d'eau, puis de diviser le premier poids par le second : le quotient est le poids spécifique cherché, celui de l'eau étant pris pour unité.

Trois méthodes sont employées pour déterminer les poids spécifiques des solides et des liquides : la méthode de la balance hydrostatique, celle des aréomètres, et celle du flacon. Toutes les trois reviennent, ainsi qu'il vient d'être dit, à chercher d'abord le poids du corps, puis celui d'un égal volume d'eau. Nous allons successivement appliquer ces diverses méthodes à la recherche des poids spécifiques des solides, puis à celle des liquides.

103. **Poids spécifiques des solides.** — 1° *Méthode de la balance hydrostatique.* — Pour obtenir le poids spécifique d'un solide, au moyen de la balance hydrostatique (fig. 52), on pèse d'abord ce corps dans l'air, puis, le suspendant au crochet de la balance, on le pèse dans l'eau. La perte de poids que l'on constate alors est, d'après le principe d'Archimède, le poids d'un volume d'eau égal à celui du corps; il ne reste donc plus qu'à diviser le poids du corps dans l'air par la perte de poids qu'il éprouve dans l'eau. Le quotient est le poids spécifique demandé (102).

Si P représente le poids du corps dans l'air, P′ son poids dans l'eau, et D son poids spécifique, le poids de l'eau déplacée étant $P - P'$, on a $D = \frac{P}{P - P'}$.

2° *Méthode de l'aréomètre de Nicholson.* — L'*aréomètre de Nicholson* est un appareil flotteur qui sert à déterminer les poids spécifiques des solides. Il se compose d'un cylindre creux (fig. 57), en fer-blanc, terminé par un cône C rempli de plomb. Celui-ci a pour objet de lester l'appareil de manière que son centre de gravité se trouve au-dessous du centre de pression, condition nécessaire pour que l'équilibre soit stable (98). A la partie supérieure, l'appareil se termine par une tige et un plateau A; ce dernier est destiné à recevoir des poids et le corps dont on cherche le poids

spécifique. Enfin, sur la tige, en *o*, est marqué un trait qu'on nomme *point d'affleurement*, et qui sert à indiquer quand l'appareil plonge de la même quantité.

Cela posé, pour expérimenter avec cet instrument, on cherche d'abord le poids qu'il faut mettre dans le plateau A pour que l'aréomètre plonge, dans l'eau, jusqu'à son point d'affleurement; car, à vide, il s'élève en partie hors de l'eau. Supposons que ce poids soit, par exemple, 125 grammes, et admettons qu'il s'agisse de trouver le poids spécifique du soufre : on en prend un morceau d'un poids moindre que 125 grammes, on le place dans le plateau A, puis on ajoute des grammes jusqu'à ce que l'aréomètre affleure de nouveau. S'il a fallu ajouter, par exemple, 55 grammes, il est évident que le poids du soufre est la différence entre 125 et 55, c'est-à-dire 70 grammes. Ayant ainsi déterminé le poids du soufre dans l'air, il ne reste plus qu'à trouver le poids d'un égal volume d'eau. Pour cela, on enlève l'aréomètre, et on porte le morceau de soufre du plateau A dans le plateau inférieur C, en *m*, ainsi que le montre la figure. Le poids total de l'instrument n'est pas changé, et cependant, en le plongeant de nouveau, on remarque qu'il n'affleure plus, ce qui provient de ce que le soufre, étant immergé, perd actuellement, de son poids, une partie égale au poids de l'eau qu'il déplace. Si l'on ajoute alors, dans le plateau supérieur, des poids jusqu'à ce que l'affleurement se rétablisse, 34gr,4, par exemple, ce nombre représente le poids du volume d'eau déplacé, c'est-à-dire du volume d'eau égal à celui du soufre. Il ne reste donc qu'à diviser 70 grammes, poids du soufre dans l'air, par 34gr,4; ce qui donne pour le poids spécifique du soufre 2,03.

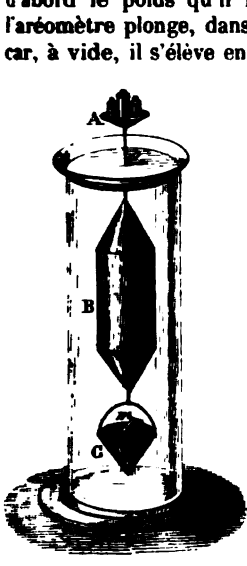


Fig. 57 (h = 40).

Si la substance dont on cherche le poids spécifique est plus légère que l'eau, elle tend à surnager et ne peut demeurer sur le plateau inférieur C. On adapte alors à celui-ci un petit grillage mobile, en fil de fer, qui s'oppose à l'ascension du corps, et le reste de l'expérience se fait comme ci-dessus.

3° *Méthode du flacon.* — Cette méthode est spécialement employée pour les corps en poudre. On y fait simplement usage d'un petit flacon, à large goulot, fermant avec un bouchon de verre usé à l'émeri. Après avoir pesé la poudre dont on cherche le poids spécifique, on la place dans un des plateaux d'une balance, et, à côté, le petit flaçon ci-dessus, exactement rempli d'eau, fermé et essuyé avec soin. Puis on établit la tare en plaçant, dans l'autre plateau, de la grenaille de plomb. Cela fait, on retire le flacon, on le débouche et y on verse la poudre. Remettant le bouchon, en ayant soin qu'il ne reste pas d'air dans le flacon, on pose de nouveau celui-ci dans le plateau où il était d'abord. L'équilibre n'a plus lieu, car la poudre a chassé du flacon une certaine quantité d'eau. Ajoutant des poids du côté du flacon jusqu'à ce que la balance reprenne sa position horizontale, le nombre de grammes ajoutés représente le poids d'un volume d'eau égal à celui de la poudre. Il ne reste plus qu'à faire le même calcul que dans les deux méthodes précédentes.

Dans cette expérience, il importe d'expulser une petite quantité d'air qui est adhérente aux molécules des corps en poudre, et qui leur fait déplacer un volume d'eau trop considérable. A cet effet, après avoir versé la poudre dans l'eau du flacon, on place celui-ci sous la cloche de la machine pneumatique et on fait le vide; l'air se dégage alors en vertu de sa force élastique. On obtiendrait le même résultat en faisant bouillir l'eau dans laquelle est la poudre.

104. Corps solubles dans l'eau. — Si, dans les trois méthodes que nous venons de décrire, il arrivait que le corps dont on cherche le poids spécifique fût soluble dans l'eau, on prendrait le poids spécifique de ce corps par rapport à un liquide dans lequel il ne serait pas soluble, l'alcool, par exemple. Puis, cherchant, par un des procédés que nous allons décrire, le poids spécifique de l'alcool par rapport à l'eau, on obient le poids spécifique de la substance donnée, en multipliant son poids spécifique par rapport à l'alcool, par celui de ce liquide par rapport à l'eau.

En effet, soient, à volume égal, P le poids de la substance, P′ celui de l'alcool, P″ celui de l'eau. $\frac{P}{P'}$ sera le poids spécifique de la substance par rapport à l'alcool, et $\frac{P'}{P''}$ celui de l'alcool par rapport à l'eau. Or, le produit de ces deux fractions, en omettant le facteur commun P′, est $\frac{P}{P''}$, qui représente, en effet, le poids spécifique de la substance par rapport à l'eau.

Poids spécifiques des solides, à zéro, comparativement à celui de l'eau distillée et à 4 degrés, pris pour unité.

Platine laminé	22,069	Marbre statuaire	2,837
— forgé	20,337	Cristal de roche pur	2,653
Or forgé	19,362	Verre de Saint-Gobain	2,488
— fondu	19,258	Porcelaine de Chine	2,385
Plomb fondu	11,352	— de Sèvres	2,146
Argent fondu	10,474	Soufre natif	2,033
Bismuth fondu	9,822	Ivoire	1,917
Cuivre rouge passé à la filière	8,878	Anthracite	1,800
— — fondu	8,788	Houille compacte	1,329
Laiton	8,383	Succin	1,078
Acier non écroui	7,816	Glace fondante	0,930
Fer en barre	7,788	Hêtre	0,852
— fondu	7,207	Frêne	0,845
Fonte	7,053	If	0,807
Étain fondu	7,291	Orme	0,800
Zinc fondu	6,861	Pommier	0,733
Antimoine fondu	6,712	Sapin jaune	0,657
Diamants (les plus lourds)	3,531	Peuplier blanc d'Espagne	0,529
— (les plus légers)	3,501	— commun	0,389
Flint-glass	3,329	Liége	0,240

105. Poids spécifiques des liquides. — 1° *Méthode de la balance hydrostatique.* — Au crochet de l'un des plateaux de la balance, on suspend un corps sur lequel le liquide dont on cherche le poids spécifique n'ait pas d'action chimique, par exemple, une boule de platine. Pesant successivement cette boule dans l'air, dans l'eau distillée prise à 4 degrés, puis dans le liquide donné, on note la perte de poids que cette masse éprouve dans l'eau et dans le second liquide, et on obtient ainsi deux nombres qui représentent, à volume égal, le poids de l'eau et celui du liquide donné; par conséquent, il n'y a plus qu'à diviser le second poids par le premier.

Soient P le poids de la boule de platine dans l'air, P′ son poids dans l'eau, P″ son poids dans le second liquide, et D le poids spécifique de celui-ci; le poids de l'eau déplacée par la boule de platine est P — P′, et celui du second liquide P — P″, d'où

$$D = \frac{P - P''}{P - P'}.$$

2° *Méthode de l'aréomètre de Fahrenheit.* — L'aréomètre de Fahrenheit (fig. 58) est un flotteur destiné à prendre les poids spécifiques des liquides. Sa forme est analogue à celle de l'aréomètre de Nicholson; mais il n'a pas de plateau à la partie inférieure, et il est en verre afin de pouvoir être placé dans toute espèce de liquide. Sa tige porte aussi un point d'affleurement destiné à

obtenir un volume immergé constant. Enfin, il est lesté à la partie inférieure par une petite boule remplie de mercure.

Avant d'expérimenter avec cet aréomètre, on en détermine le poids avec précision; puis, le faisant flotter dans une éprouvette remplie d'eau, on ajoute des poids dans la capsule supérieure jusqu'à ce que le point d'affleurement atteigne le niveau de l'eau. En cet état, d'après la première condition d'équilibre des corps flottants (98), le poids de l'aréomètre, ajouté au poids qui est dans la capsule, représente le poids d'un volume d'eau égal à celui de la partie immergée de l'appareil. Déterminant, de la même manière, le poids d'un égal volume du liquide dont on cherche le poids spécifique, il ne reste plus qu'à diviser le dernier poids par le premier.

Fig. 58. (h = 25).

L'aréomètre de Fahrenheit et celui de Nicholson n'offrent pas la même précision que la balance hydrostatique pour la détermination des poids spécifiques.

3° *Méthode du flacon.* — Cette méthode consiste à prendre un petit flacon de verre, fermant avec un bouchon usé à l'émeri, à le peser vide de tout liquide, puis à le peser successivement plein d'eau et plein du liquide dont on cherche le poids spécifique. Si l'on retranche alors le poids du verre de celui obtenu dans chacune des deux dernières pesées, on a, sous le même volume, le poids de l'eau et celui du liquide, et on en déduit le poids spécifique cherché.

106. **Température à observer dans la recherche des poids spécifiques.** — Comme le volume des corps augmente avec la température, et comme cette augmentation varie d'un corps à l'autre, il s'ensuit que le poids spécifique d'une substance quelconque n'est pas rigoureusement le même à des températures différentes. C'est pourquoi on a dû choisir une température constante pour la détermination des poids spécifiques. On est convenu, en conséquence, que l'eau serait à 4 degrés, parce que c'est la température à laquelle correspond son maximum de densité. Quant aux autres corps, solides ou liquides, on les suppose à zéro. Ces conditions ne sont pas généralement satisfaites lorsqu'on détermine un poids spécifique. Dans l'étude du calorique, on verra les corrections à faire pour revenir à ces températures.

Poids spécifiques des liquides, à zéro, comparativement à celui de l'eau distillée et à 4 degrés, pris pour unité.

Mercure	13,598	Eau distillée, à 4°	1,000
Acide sulfurique	1,841	— — à 0°	0,999
— chlorhydrique	1,24.	Huile d'olive	0,915
— azotique	1,217	Essence de térébenthine	0,870
Lait	1,03.	Huile de naphte	0,847
Eau de mer	1,026	Alcool absolu	0,792
Vin de Bordeaux	0,994	Éther sulfurique	0,715

107. Usages des tables des poids spécifiques. — Les tables des poids spécifiques présentent de nombreuses applications. En minéralogie, elles fournissent un caractère distinctif pour reconnaître les espèces minérales d'après leur densité. Elles servent encore à trouver le poids d'un corps dont le volume est connu, ou réciproquement, à calculer le volume lorsque le poids est donné.

En effet, le gramme et le kilogramme étant respectivement le poids d'un centimètre et d'un décimètre cubes d'eau, il en résulte qu'un volume d'eau, mesuré en centimètres cubes, pèse autant de grammes qu'il contient de centimètres, et que si le volume est mesuré en décimètres cubes, l'eau pèse autant de kilogrammes qu'il y a de décimètres. On a donc, pour l'eau, la formule $P = V$, à la condition de compter le poids en grammes ou en kilogrammes, suivant que le volume l'est en centimètres ou en décimètres cubes. Cela posé, le poids spécifique d'un corps n'étant autre chose qu'un nombre qui marque combien ce corps pèse par rapport à l'eau, il s'ensuit qu'un corps qui a un poids spécifique deux, trois fois plus grand que l'eau, pèse aussi deux, trois fois davantage. Par conséquent, si l'on représente le poids spécifique par D, la formule $P = V$ se change, pour tout autre corps que l'eau, en $P = VD$. C'est-à-dire que *le poids relatif d'un corps est égal au produit de son volume par son poids spécifique.*

De la formule $P = VD$, on déduit $V = \frac{P}{D}$; formule qui fait connaître le volume en centimètres ou en décimètres cubes, suivant que le poids est exprimé en grammes ou en kilogrammes.

Comme application de la formule $P = VD$, proposons-nous de calculer le diamètre intérieur d'un tube de verre. A cet effet, on introduit dans ce tube une colonne de mercure dont on mesure avec précision la longueur et le poids à zéro. Cette colonne de mercure pouvant être regardée comme très-sensiblement cylindrique, on a, d'après la mesure des cylindres, en géométrie, $V = \pi r^2 l$; r étant le rayon du cylindre, l sa hauteur, et π le rapport de la circonférence au diamètre. Remplaçant V par sa valeur, dans l'égalité $P = VD$, il vient $P = \pi r^2 l D$; d'où $r = \sqrt{\frac{P}{\pi l D}}$.

On calculerait d'une manière analogue le diamètre d'un fil métallique très-fin.

La formule $P = VD$, dont on vient de faire usage, sert à trouver le poids relatif d'un corps, tandis que les formules $P = VDg$ et $P = Mg$, données précédemment (11), représentent le poids absolu.

ARÉOMÈTRES A VOLUME VARIABLE.

108. **Différentes espèces d'aréomètres.** — Les aréomètres de Nicholson et de Fahrenheit, décrits ci-dessus, sont dits *à volume constant et à poids variable*, parce qu'on les fait toujours plonger de la même quantité, mais en y ajoutant des poids qui varient avec les solides ou les liquides sur lesquels on expérimente. Or, on construit aussi des aréomètres *à volume variable et à poids constant*, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas de point d'affleurement fixe et conservent toujours le même poids. Ces instruments, nommés *pèse-sels*, *pèse-acides*, *pèse-liqueurs*, ne sont point destinés à mesurer les poids spécifiques des liquides, mais à faire connaître si les dissolutions salines, les acides, les alcools, sont plus ou moins concentrés.

Fig. 59 (h = 26).

109. **Aréomètre de Baumé.** — Baumé, pharmacien à Paris, mort en 1804, a construit un aréomètre à poids constant, dont l'usage est très-répandu. C'est un flotteur en verre, formé d'une tige AB (fig. 59), à laquelle est soudée une boule un peu grosse, remplie d'air, et à celle-ci une boule plus petite pleine de mercure, qui sert de lest.

Il y a deux modes de graduer cet instrument, suivant qu'il doit plonger dans les liquides plus denses que l'eau ou moins denses. Dans le premier cas, on en règle le poids de manière que, dans l'eau distillée et à 4 degrés, il plonge à peu près jusqu'à l'extrémité supérieure de sa tige, en un point A, où l'on marque 0. Pour achever la graduation, on fait une dissolution de 85 parties d'eau, en poids, et 15 de sel marin. Cette dissolution étant plus dense que l'eau pure, l'appareil n'y plonge que jusqu'à un point B, où l'on marque 15. Partageant enfin l'intervalle des points A et B en 15 parties égales, et continuant les divisions jusqu'au bas de la tige, l'instrument est gradué. Les divisions sont marquées sur une petite bande de papier placée dans l'intérieur de la tige.

L'aréomètre ainsi construit ne peut être employé que pour les liquides plus denses que l'eau, tels que les acides et les dissolutions salines : c'est en même temps un pèse-acides et un pèse-sels. Pour les liquides moins denses que l'eau, le zéro devant se trouver au

bas de la tige, la graduation est changée. Baumé a pris pour zéro le point d'affleurement dans une dissolution de 90 d'eau, en poids, avec 10 de sel marin, et, pour 10, le point d'affleurement dans l'eau distillée. Divisant ensuite l'intervalle de ces deux points en dix parties égales que l'on continue jusqu'au sommet de la tige, l'appareil est terminé : c'est le pèse-liqueurs.

Les deux aréomètres que nous venons de décrire, dus tous les deux à Baumé, sont gradués d'une manière tout à fait arbitraire, et n'indiquent ni les densités des liquides, ni les quantités de sel dissoutes. Cependant, ils sont avantageusement employés pour reconnaître quand une dissolution saline ou acide a été portée à un point de concentration déterminé. En un mot, ils offrent des points de repère à l'aide desquels on reproduit rapidement des mélanges ou des dissolutions dans des proportions données, non pas avec précision, mais avec une approximation suffisante dans un grand nombre de cas. Par exemple, dans la fabrication des sirops ordinaires, on a constaté, par l'expérience, que le pèse-sels de Baumé doit marquer 35, à froid, dans un sirop bien confectionné. C'est donc là, pour le fabricant, un instrument facile à consulter pour le degré de concentration de son sirop. De même, dans l'eau de mer, à la température de 22 degrés, le pèse-sels de Baumé marque 3, ce qui donne une indication pour les bains salés ordonnés dans certaines affections. Les proportions de sel marin que prescrivent les médecins sont, en général, beaucoup plus faibles que celles que donne l'aréomètre ; c'est-à-dire que les bains salés artificiels n'ont pas le degré de salure de l'eau de mer, ce qui ôte à ces bains de leur efficacité.

110. Alcoomètre centésimal de Gay-Lussac. — L'alcoomètre de Gay-Lussac est un instrument destiné à mesurer la *force* des liquides spiritueux à 15°, c'est-à-dire *le nombre de centièmes d'alcool pur, en volume, que contiennent ces liquides à cette température.*

La forme de l'alcoomètre est entièrement celle de l'aréomètre de Baumé (fig. 59); mais sa graduation, qui est faite à 15 degrés, est différente. L'échelle placée sur la tige est divisée en 100 parties, ou degrés, dont chacune représente un centième d'alcool en volume; la division 0 correspond à l'eau pure, et la division 100 à l'alcool pur. Plongé dans un liquide spiritueux à 15°, l'alcoomètre en fait connaître immédiatement la force. Par exemple, si dans une eau-de-vie à 15°, l'alcoomètre s'enfonce jusqu'à la division 48, cela indique que la force de cette eau-de-vie est de 48 centièmes, c'est-

à-dire qu'elle contient 48 centièmes de son volume d'alcool pur et le reste d'eau : car on sait que les liquides connus dans le commerce sous les noms d'*eaux-de-vie* et d'*esprits*, sont des mélanges d'eau et d'alcool.

L'échelle de l'alcoomètre se gradue en plongeant successivement cet instrument dans des mélanges d'alcool et d'eau dans des proportions déterminées. Mais pour que la graduation soit exacte, il faut tenir compte de la contraction de volume que subissent l'alcool et l'eau quand on les mélange (10).

Pour cela, soient v le volume de l'eau, v' celui de l'alcool, et V le volume du mélange, qui est moindre que $v + v'$; soient en outre d' la densité de l'alcool et δ la densité du mélange, laquelle se détermine par la balance hydrostatique ou par l'aréomètre de Fahrenheit; la densité de l'eau étant 1, on a, en poids,

$$v + v'd' = V\delta, \text{ d'où } V = \frac{v + v'd'}{\delta}.$$

Le volume V une fois connu, on détermine sur l'échelle le nombre de divisions n correspondant au point d'affleurement dans le mélange $v + v'$, par la proportion

$$\frac{100}{n} = \frac{V}{v'}, \text{ d'où } n = \frac{100\ v'}{V}.$$

Il importe d'observer que la graduation de l'alcoomètre étant faite à 15°, ce n'est qu'à cette température que ses indications sont précises. En effet, à des températures plus hautes ou plus basses que 15°, les liquides se dilatant ou se contractant, l'alcoomètre enfonce plus ou moins, c'est-à-dire que la chaleur altère à la fois le volume du liquide spiritueux et les indications de l'alcoomètre : de là deux causes d'erreur qui sont de même sens, et qui, réunies, peuvent s'élever à plus de 12 pour 100 de la valeur du liquide, de zéro à 30 degrés. Pour corriger ces deux erreurs, Gay-Lussac a construit des tables qui contiennent, dans une colonne verticale, la température de 0 à 30 degrés, et, dans une colonne horizontale, les degrés de l'aréomètre de 0 à 100. Puis, de même que dans la table de multiplication ordinaire, au point de rencontre de la verticale abaissée de la case qui contient les degrés alcoométriques avec l'horizontale qui part de la case où sont les degrés du thermomètre, se trouve le nombre qui indique la richesse réelle du liquide spiritueux. Par exemple, un semblable liquide étant à la température de 22°, et l'alcoomètre y marquant 36, on trouve dans la table que la richesse réelle de ce liquide, ramené à 15°, est 33 : c'est-à-dire qu'il contient les 33 centièmes de son volume d'alcool, et par suite 67 centièmes d'eau.

111. Pèse-sels gradués sur le principe de l'alcoomètre centésimal. — On construit aussi des pèse-sels gradués sur le principe de l'alcoomètre centésimal; c'est-à-dire qu'ils font connaître la quantité, en poids, de tel ou tel sel contenu dans une dissolution. Le zéro de tous ces instruments correspond à l'eau pure; et leur graduation se forme en faisant dissoudre 5, 10, 15, 20... grammes du sel donné, dans 95, 90, 85, 80... grammes d'eau, jusqu'à saturation de la dissolution. Plongeant ensuite l'instrument successivement dans ces dissolutions, on marque 5, 10, 15, 20... aux différents points d'affleurement, et on divise chaque intervalle en 5 parties égales.

Ces instruments offrent cet inconvénient, qu'il faut un pèse-sel spécial pour chaque espèce de sel. Celui qui aurait été gradué pour l'azotate de potasse, par exemple, ne donnerait que des indications complétement fausses dans une dissolution de carbonate de potasse ou de tout autre sel.

On a construit sur le même principe des *pèse-laits*, des *pèse-vins*, destinés à mesurer la quantité d'eau que la fraude peut avoir introduite dans ces liquides. Mais ces instruments ne présentent pas une utilité réelle, parce que les densités du lait et du vin étant très-variables, même lorsque ces liquides son parfaitement naturels, on pourrait attribuer à la fraude ce qui serait dû uniquement à la mauvaise qualité naturelle du lait ou du vin. Plusieurs médecins font aussi usage de *pèse-urines*, fondés sur le même principe.

* **112. Densimètres.** — Les *densimètres* sont des aréomètres gradués de manière à faire connaître la densité relative d'un liquide d'après le degré dont ils s'y enfoncent. Nous décrirons celui de Gay-Lussac, et celui qu'a inventé récemment M. Rousseau.

1° *Densimètre de Gay-Lussac.* — Le densimètre de Gay-Lussac est entièrement semblable à l'aréomètre de Baumé; il n'en diffère que par la graduation, qui varie selon que l'appareil est destiné aux liquides plus denses ou moins denses que l'eau. Dans le premier cas, on le leste de manière que dans l'eau pure il plonge jusqu'en un point A (fig. 59) situé à l'extrémité supérieure de la tige. Choisissant ensuite un liquide dont la densité soit connue et plus grande que celle de l'eau, dans le rapport de 4 à 3, par exemple, on y plonge l'appareil qui n'entre plus qu'à un certain point B de la tige. Or, si l'on représente par V et v les volumes immergés respectivement dans l'eau et dans le second liquide, ces volumes étant en raison inverse des densités de ces liquides (98), on a

$$\frac{V}{v} = \frac{4}{3}; \text{ d'où } v = \frac{3}{4} V.$$

Si donc on représente par 100 le volume V, le volume v le sera par 75. En conséquence, on inscrit respectivement aux points A et B les nombres 100 et 75; le volume AB étant, d'après la valeur de v, le quart de V, on partage l'espace AB en 25 parties égales, et chacune de ces parties est $\frac{1}{25}$ de AB, ou $\frac{1}{100}$ de V, c'est-à-dire du volume

immergé dans l'eau pure. Enfin, on continue les divisions jusqu'à la partie inférieure de la tige, cette tige devant être exactement de même diamètre dans toute sa longueur.

Cela posé, pour connaître la densité d'un liquide, de l'acide sulfurique, par exemple, il suffit d'y plonger le densimètre, et s'il affleure à la 54e division, cela indique que le volume du liquide déplacé est représenté par 54, celui du volume d'eau V l'étant par 100. Or, tout corps flottant déplaçant un poids de liquide égal au sien (98), il s'ensuit que le volume d'eau V, ou 100, et le volume d'acide sulfurique 54, ont le même poids, celui de l'instrument; mais, à poids égaux, les volumes de deux corps sont évidemment en raison inverse de leurs densités. Par conséquent, si l'on représente par x la densité de l'acide sulfurique, celle de l'eau étant 1, on a l'égalité

$$\frac{x}{1} = \frac{100}{54}, \text{ d'où } x = \frac{100}{54} = 1,85.$$

Si le densimètre est destiné à des liquides moins denses que l'eau, il faut le lester de manière que le point 100, correspondant à l'eau distillée, se trouve à la partie inférieure de la tige. On fixe ensuite à l'extrémité supérieure de celle-ci un poids qui soit le quart de celui de l'instrument. Or, le poids de l'instrument, lorsqu'il était seul, ayant été représenté par 100, son poids total actuel est 125. On inscrit donc ce dernier nombre en regard du nouveau point d'affleurement, puis on divise l'intervalle des points 100 et 125 en 25 parties égales que l'on continue jusqu'au sommet de la tige.

Fig. 60 (h=30).

2° *Densimètre de M. Rousseau.* — Le densimètre de Gay-Lussac nécessite une quantité de liquide suffisante pour remplir une éprouvette d'une capacité assez considérable. Or, dans certains cas, en physiologie, par exemple, lorsqu'on expérimente sur des liquides animaux, il peut arriver qu'on ne puisse disposer que de quelques grammes de matières. Dans ce cas, le densimètre de M. Rousseau donne facilement la densité. Cet instrument a la forme de l'aréomètre de Baumé; mais le sommet de la tige porte une petite capsule A (fig. 60), destinée à recevoir le liquide dont on cherche la densité. Sur la paroi de cette capsule est un trait indiquant une capacité AC d'un centimètre cube.

Cela posé, pour graduer l'instrument, on le leste de manière que, dans l'eau distillée et à 4 degrés, son point d'affleurement se trouve en B, à la naissance de la tige; ce point est le zéro de l'instrument. On remplit ensuite d'eau distillée et à 4 degrés la capacité d'un centimètre cube graduée sur la capsule, ou, ce qui est la même chose, on y met un poids d'un gramme; puis, au nouveau point d'affleurement, on marque 20. On divise alors l'intervalle de 0 à 20 en 20 parties égales, et on continue les divisions jusqu'au sommet de la tige. Celle-ci étant exactement de même diamètre dans toute sa longueur, chaque division correspond à $\frac{1}{20}$ de gramme, ou gr. 0,05.

D'après cette graduation, si l'on veut obtenir la densité d'un liquide, de la bile, par exemple, on en remplit la capacité AC marquée sur la capsule, et si l'instrument affleure à 20 divisions et demie, on en conclut que le poids de la bile qui est dans la capsule égale gr. 0,05 × 20,5, ou gr. 1,025; c'est-à-dire qu'à volume égal, le poids de l'eau étant 1, celui de la bile est 1,025. Ce dernier nombre représente donc la densité de la bile par rapport à l'eau; car, sous le même volume, les poids sont dans le même rapport que les densités.

CHAPITRE II

CAPILLARITÉ, ENDOSMOSE, ABSORPTION ET IMBIBITION.

113. Phénomènes capillaires. — Il se produit, au contact des solides et des liquides, une série de phénomènes auxquels on a donné le nom de *phénomènes capillaires*, parce qu'ils s'observent surtout dans les tubes d'un diamètre assez petit pour être comparable à celui d'un cheveu. La partie de la physique qui a pour objet l'étude des phénomènes capillaires se désigne sous le nom de *capillarité*. Toutefois, cette expression s'applique aussi à la force même qui produit ces phénomènes.

Les effets de la capillarité sont très-variés; mais, dans tous les cas, ils sont dus à

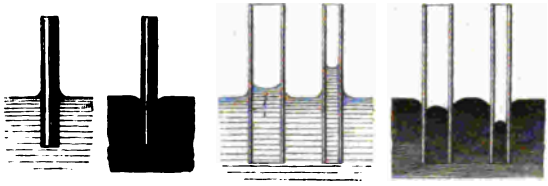


Fig. 61. Fig. 62. Fig. 63. Fig. 64.

l'attraction mutuelle des molécules liquides entre elles, et à celle qui s'exerce entre ces molécules et les corps solides. Tels sont les phénomènes suivants :

Lorsqu'on plonge un corps dans un liquide qui soit de nature à le mouiller, le liquide, comme s'il n'était plus soumis aux lois de l'hydrostatique, est soulevé autour du corps solide, et sa surface, cessant d'être horizontale, prend une forme concave (fig. 61).

Si, au contraire, le corps plongé n'est pas mouillé par le liquide, ce qui a lieu pour le verre en contact avec le mercure, le liquide, au lieu de s'élever, se déprime, et sa surface prend une forme convexe autour du corps plongé, comme le montre la figure 62. La surface du liquide affecte la même concavité ou convexité sur les bords du vase qui le contient, suivant qu'il en mouille ou n'en mouille pas les parois.

Ces phénomènes deviennent plus apparents lorsque, au lieu d'une masse pleine, on plonge, dans le liquide, des tubes de verre creux d'un petit diamètre. Selon que ces tubes sont ou ne sont pas mouillés par le liquide, il se produit une ascension ou une dépression d'autant plus grande que le diamètre est plus petit (fig. 63 et 64).

Lorsque les tubes sont mouillés par le liquide, la surface de celui-ci prend la forme d'un segment hémisphérique concave qu'on nomme *ménisque concave* (fig. 63); lorsque les tubes ne sont pas mouillés, on a un *ménisque convexe* (fig. 64).

114. Lois de l'ascension et de la dépression dans les tubes capillaires. — Gay-Lussac a démontré, par l'expérience, que l'ascension et la dépression des liquides, dans les tubes capillaires sont soumises aux trois lois suivantes :

1° *Il y a ascension lorsque le liquide mouille les tubes, et dépression s'il ne les mouille pas;*

2° *Cette ascension et cette dépression sont en raison inverse des diamètres des tubes, tant que ces diamètres ne dépassent pas 2 à 3 millimètres;*

3° *L'ascension et la dépression varient avec la nature du liquide et avec la tem-*

pérature, mais elles sont indépendantes de la substance des tubes et de l'épaisseur de leurs parois, si celles-ci ont été préalablement mouillées.

Toutes ces lois se vérifient dans le vide comme dans l'air.

Dans l'emploi de plusieurs appareils, il est nécessaire de connaître la valeur de la dépression du mercure dans les tubes de verre. La table suivante donne ces dépressions dans des tubes de 2 à 10 millimètres de diamètre :

Diamètres des tubes en millimètres.	Dépressions en millimètres.	Diamètres des tubes en millimètres.	Dépressions en millimètres.
2	4,454	6,5	1,030
2,5	3,568	7	0,909
3	2,918	7,5	0,803
3,5	2,442	8	0,712
4	2,068	8,5	0,632
4,5	1,774	9	0,562
5	1,534	9,5	0,500
5,5	1,337	10	0,445
6	1,171		

115. Lois de l'ascension et de la dépression entre deux lames parallèles ou inclinées. — Des phénomènes analogues à ceux que présentent les tubes capillaires se produisent entre deux corps de forme quelconque plongés dans un liquide, lorsqu'ils sont suffisamment rapprochés. Par exemple, si l'on plonge dans

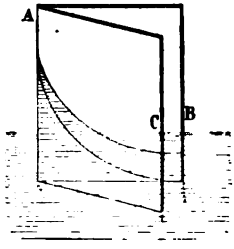


Fig. 65.

Fig. 66.

Fig. 67.

l'eau deux lames de verre parallèles assez peu distantes pour que les deux courbures formées à leur contact par le liquide viennent à se joindre, on observe : 1° que *l'eau s'élève régulièrement entre les deux lames, en raison inverse de l'intervalle qui les sépare ;* 2° que *la hauteur de l'ascension, pour un intervalle donné, est la moitié de celle qui aurait lieu dans un tube dont le diamètre serait égal à cet intervalle.*

Si les lames parallèles plongent dans le mercure, il y a dépression, mais suivant les mêmes lois.

Deux lames de verre AB et AC étant inclinées entre elles comme le montre la figure 65, si on les plonge dans un liquide qui les mouille, de manière que leur ligne de contact soit verticale, le liquide s'élève vers le sommet de l'angle des deux lames, et sa surface, du point le plus haut au point le plus bas, affecte la forme de la courbe connue en géométrie sous le nom d'*hyperbole équilatère*.

Lorsque la ligne de contact des deux lames est horizontale, comme cela aurait lieu

dans les lames représentées dans les figures 66 et 67, si on les prolongeait, et lorsqu'en même temps l'angle qu'elles forment est très-petit, une goutte d'eau placée entre elles s'arrondit à ses deux extrémités en ménisque concave (fig. 66), et se précipite vers le sommet de l'angle des deux lames. Si, au contraire, le liquide ne mouille pas es lames, comme cela a lieu pour le mercure, la goutte s'arrondit en se terminant en ménisque convexe (fig. 67), et elle s'éloigne du sommet de l'angle.

446. Attraction et répulsion qui résultent de la capillarité. — C'est à la capillarité que sont dues les attractions et les répulsions qu'on observe entre les corps qui flottent à la surface des liquides, attractions et répulsions qui sont soumises aux lois suivantes :

Lorsque deux corps flottants sont mouillés tous les deux par le liquide, par exemple, deux balles de liége dans l'eau, il se produit une forte attraction aussitôt que les deux balles sont assez rapprochées pour qu'il n'existe plus entre elles de surface plane.

Si les corps ne sont mouillés ni l'un ni l'autre, comme deux balles de cire sur l'eau, on observe encore une vive attraction aussitôt que celles-ci sont placées dans la même condition que ci-dessus.

Enfin, si, des deux corps flottants, l'un est mouillé par le liquide et que l'autre ne le soit pas, comme une balle de liége et une balle de cire dans l'eau, on voit les deux balles se repousser au moment où elles sont suffisamment rapprochées pour que les deux courbures contraires du liquide se trouvent en contact.

Tous les phénomènes capillaires qui viennent d'être décrits dépendant de la courbure concave ou convexe que prend la surface du liquide au contact des corps, il nous reste à faire connaître la cause qui détermine la forme de cette courbure.

447. Cause de la courbure des surfaces liquides au contact des solides. — La forme de la surface d'un liquide au contact d'un corps solide pro-

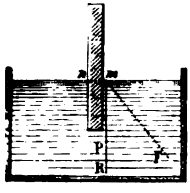


Fig. 68.

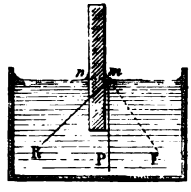


Fig. 69.

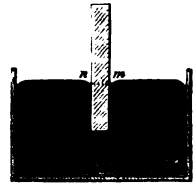


Fig. 70.

vient du rapport qui existe entre l'attraction du solide sur le liquide, et l'attraction du liquide sur lui-même.

En effet, soit une molécule liquide *m* (fig. 68) en contact avec un corps solide. Cette molécule est soumise à trois forces : la pesanteur qui la sollicite suivant la verticale *m*P, l'attraction du liquide qui agit dans une direction *m*F, et l'attraction de la lame qui s'exerce dans la direction *mn*. Or, selon les intensités respectives de ces forces, leur résultante peut prendre les trois positions suivantes :

1° Cette résultante est dirigée suivant la verticale *m*R (fig. 68); alors la surface en *m* est plane et horizontale, car, d'après les conditions d'équilibre des liquides (87) leur surface doit être perpendiculaire à la force qui sollicite leurs molécules.

2° La force *n* augmentant, ou F diminuant, la résultante R est dirigée dans l'angle *m*P (fig. 69); dans ce cas, la surface prend une direction inclinée perpendiculaire à *m*R, et elle est concave.

3° La force F augmentant, ou *n* diminuant, la résultante R prend la direction *m*R

(fig. 70) dans l'angle PmF, et la surface, se disposant perpendiculairement à cette direction, devient convexe.

Le calcul montre que, dans le premier cas, l'attraction du liquide sur lui-même est double de celle du solide sur le liquide ; dans le second cas, l'attraction du liquide est plus petite que le double de celle du solide ; dans le troisième, elle est plus grande.

118. Influence de la courbure du liquide sur les phénomènes capillaires. — C'est de la forme concave ou convexe du ménisque que dépend l'ascension ou la dépression d'un liquide dans un tube capillaire. En effet, si l'on considère un ménisque concave *abcd* (fig. 71), les molécules liquides de ce ménisque étant soutenues en équilibre par les forces qui les sollicitent (117), elles n'exercent aucune pression sur les couches inférieures ; de plus, elles agissent, en vertu de l'at-

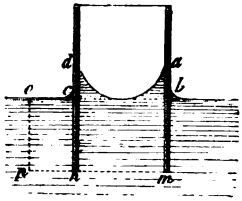


Fig. 71.

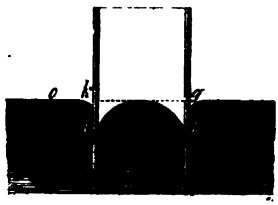


Fig. 72.

traction moléculaire, sur les couches inférieures les plus voisines, d'où il résulte que sur une couche quelconque *mn*, considérée dans l'intérieur du tube, la pression est moindre que s'il n'y avait point de ménisque. Par conséquent, d'après les conditions d'équilibre des liquides (81 et 87), le liquide dont s'élever dans le tube jusqu'à ce que la pression intérieure sur la couche *mn* soit égale à la pression *op*, qui s'exerce extérieurement sur un point quelconque *p* de la même couche.

Dans le cas où le ménisque est convexe (fig. 72), l'équilibre existe encore, en vertu des forces moléculaires qui sollicitent le liquide ; mais les molécules qui occuperaient l'espace *ghik*, s'il n'y avait pas d'action capillaire, étant supprimées, elles n'agissent plus par attraction sur les molécules inférieures. Il résulte de là que la pression, sur une tranche quelconque *mn*, est plus grande, dans l'intérieur du tube, que si l'espace *ghik* était rempli, car les forces moléculaires dont il s'agit sont beaucoup plus intenses que la pesanteur. Le liquide doit donc s'abaisser dans le tube jusqu'à ce que la pression intérieure, sur la tranche *mn*, soit la même qu'en un point quelconque *p* de cette tranche.

La théorie de la capillarité, une des plus difficiles de la physique, ne peut être traitée d'une manière complète que par l'analyse mathématique : aussi a-t-elle été étudiée surtout par les mathématiciens, et particulièrement, en France, par Clairaut, Laplace et Poisson. Telle que nous venons de la faire connaître, cette théorie rend compte de l'ascension et de la dépression des liquides non-seulement dans les tubes, mais encore entre les lames parallèles ou inclinées (115). Elle explique également les attractions et les répulsions qu'on observe entre les corps flottants (116).

119. Faits divers dépendants de la capillarité. — Au nombre des phénomènes qui ont pour cause la capillarité, nous citerons les suivants :

Lorsqu'un tube capillaire est plongé dans un liquide qui le mouille, si on l'en retire avec précaution, on observe que la colonne liquide qui reste suspendue dans le tube est plus grande que l'ascension qui avait lieu lorsque ce tube plongeait. Ceci résulte de ce que le tube entraîne avec lui une goutte liquide qui adhère à sa partie inférieure

et y forme un ménisque convexe dont l'action concourt avec celle du ménisque concave supérieur pour soutenir une colonne plus grande (118).

C'est par la même raison qu'un tube capillaire plongé dans un liquide n'y donne lieu à aucun écoulement, quoique plus court que la colonne liquide qui tend à s'élever dans ce tube. Cela provient de ce qu'à l'instant où le liquide atteint le haut du tube, sa surface supérieure, de concave qu'elle était, devient convexe, et, par conséquent, la pression devenant plus grande que si sa surface était plane, le mouvement ascensionnel s'arrête.

On voit souvent les insectes se maintenir à la surface de l'eau sans y enfoncer. C'est là un phénomène capillaire qui résulte de ce que leurs pattes n'étant pas mouillées par le liquide, il se produit autour d'elles une dépression qui soutient les insectes malgré leur poids, de même que l'eau est soutenue dans les tubes. C'est par une dépression semblable qu'une aiguille fine à coudre, posée doucement sur l'eau, reste à la surface quand elle est enduite d'une matière grasse, parce qu'alors elle n'est pas mouillée ; mais si elle a été lavée dans l'alcool ou la potasse, elle va au fond.

C'est encore par un effet capillaire que l'huile s'élève dans les mèches des lampes, et qu'il y a pénétration des liquides dans les bois, dans les éponges, et, en général, dans tous les corps qui possèdent des pores sensibles (15). Enfin, sous les noms d'endosmose, d'absorption et d'imbibition, nous allons faire connaître de nouveaux phénomènes qui ont une grande analogie avec la capillarité et souvent se confondent avec elle.

* ENDOSMOSE, ABSORPTION ET IMBIBITION.

120. Endosmose et exosmose. — On a donné les noms d'*endosmose* et d'*exosmose* à des courants de direction contraire qui s'établissent entre deux liquides de nature différente, lorsqu'ils sont séparés par une cloison mince et très-poreuse, organique ou inorganique. Ces expressions, qui signifient *courant entrant* et *courant sortant*, ont été adoptées par M. Dutrochet, qui, en 1826, fit connaître d'une manière complète ces phénomènes, jusqu'alors fort peu étudiés. Ces courants se constatent au moyen de l'*endosmomètre*. On nomme ainsi une poche membraneuse surmontée d'un tube de verre un peu long, autour duquel elle adhère hermétiquement au moyen d'une ligature (fig. 73). Cette poche étant remplie d'une dissolution fortement gommée ou d'un autre liquide plus dense que l'eau, comme le lait, l'albumine, une dissolution de sucre, on la plonge dans un vase rempli d'eau. Bientôt on remarque que le niveau s'élève peu à peu dans le tube, à une hauteur qui peut atteindre plusieurs décimètres, et qu'il s'abaisse dans le vase où plonge l'endosmomètre ; d'où il faut conclure qu'une partie de l'eau pure a passé à travers la membrane pour aller se mélanger au liquide intérieur. On constate, de plus, qu'au bout d'un certain temps, l'eau dans laquelle plonge l'endosmomètre contient de la gomme. Il s'est donc produit un courant dans les deux sens. On dit alors qu'il y a endosmose pour le liquide dont le volume augmente. Si l'on met l'eau pure dans la poche membraneuse, et si l'on plonge celle-ci dans l'eau gommée, l'endosmose se produit encore de l'eau pure vers l'eau gommée, c'est-à-dire que c'est à l'extérieur que le niveau s'élève.

La hauteur d'ascension dans l'endosmomètre varie avec les différents liquides. De toutes les substances végétales, le sucre dissous est celle qui, à densité égale, présente le plus grand pouvoir d'endosmose ; de toutes les substances animales, c'est l'albumine. La gélatine, au contraire, ne possède qu'une force d'endosmose très-faible. C'est, en général, vers le liquide le plus dense que se dirige le courant d'endosmose. Toutefois, l'alcool et l'éther font exception, ces liquides se comportant, par rapport à l'eau, comme des liquides plus denses. Avec les acides, suivant qu'ils sont plus ou moins étendus, il y a endosmose de l'eau vers l'acide ou de l'acide vers l'eau.

M. Dutrochet a constaté que, pour que les phénomènes d'endosmose se produisent, il faut : 1° que les liquides soient hétérogènes et susceptibles de se mélanger, comme l'eau et l'alcool, par exemple, tandis qu'avec l'eau et l'huile il n'y a rien : 2° que les deux liquides soient de densité différente ; 3° que la cloison qui sépare les liquides soit perméable au moins à l'un d'eux.

Toutes les substances végétales et animales sont perméables ; quant aux substances inorganiques, comme les ardoises, le grès, la porcelaine dégourdie, la terre de pipe peu cuite, elles sont d'autant moins perméables qu'elles contiennent plus de silice. La terre de pipe, qui est plus alumineuse que la porcelaine, est plus perméable : c'est ce qui fait qu'elle happe à la langue.

A travers les lames minces inorganiques, le courant est faible, mais peut se continuer indéfiniment. Les membranes organiques, au contraire, se désorganisent promptement et l'endosmose cesse.

Fig. 73.

On a proposé plusieurs théories de l'endosmose. Les uns l'ont attribuée à un courant électrique qui se dirigerait dans le même sens que l'endosmose. D'autres ont admis que la cause du phénomène était une action capillaire jointe à l'affinité des deux liquides. On a admis encore que l'endosmose était due à une inégale viscosité des liquides. Enfin, on a attribué ce phénomène à la plus ou moins grande perméabilité des membranes pour tel ou tel liquide. De toutes ces hypothèses, aucune n'explique l'endosmose d'une manière satisfaisante. Quoi qu'il en soit, le phénomène paraît se rattacher intimement aux mêmes causes que la capillarité : cependant, on observe que l'élévation de température, qui active l'endosmose, affaiblit la capillarité.

121. Endosmose des gaz. — Les gaz présentent de véritables phénomènes d'endosmose. Si deux gaz de nature différente sont séparés par une membrane sèche, il y a simplement mélange, c'est-à-dire courants égaux des deux côtés ; mais si la membrane est humide, il y a endosmose, c'est-à-dire courants inégaux. Pour faire l'expérience, on renferme une vessie pleine d'acide carbonique dans une seconde vessie plus grande et contenant de l'oxygène. Cette dernière se remplit d'acide carbonique, ce qui montre qu'il y a endosmose de l'acide carbonique vers l'oxygène. De même, si l'on souffle une bulle de savon et qu'on la place sous une cloche pleine d'acide carbonique, on la voit se gonfler.

122. Absorption et imbibition. — Les mots *absorption* et *imbibition*, en physique, sont à peu près synonymes : tous les deux indiquent également une pénétration d'une substance étrangère dans un corps poreux. Toutefois, l'absorption se dit indistinctement en parlant des substances liquides ou gazeuses, tandis que l'imbibition s'entend spécialement des liquides.

En physiologie, on distingue l'absorption de l'imbibition. Dans le premier phénomène, il y a pénétration d'une substance étrangère dans les tissus d'un être vivant,

tandis que l'imbibition ne se dit que d'une pénétration dans les corps poreux privés de vie, soit organiques, soit inorganiques. En un mot, dans l'absorption, les forces vitales sont mises en jeu : elles ne le sont pas dans l'imbibition.

123. Absorption des gaz. — La propriété d'absorber les gaz, dans le sens physique, appartient à tous les corps doués de pores sensibles (15), mais à des degrés très-variables. Cette propriété se rencontre surtout dans le charbon de chêne. Éteint sous une cloche remplie d'un gaz donné, ce corps absorbe, à la pression ordinaire, 90 fois son volume de gaz ammoniac, 35 fois son volume de gaz acide carbonique, et 9 fois son volume d'oxygène. Mouillé, le charbon absorbe deux fois moins, ce qui prouve qu'il doit sa propriété absorbante à sa porosité, et, par conséquent, à une action capillaire. Le pouvoir absorbant du charbon de sapin est deux fois moindre que celui du charbon de chêne. Le charbon de liége, qui est extrêmement poreux, n'absorbe pas; il en est de même du charbon naturel très-compacte qu'on nomme graphite. On conclut de là que la porosité étant une condition essentielle de l'absorption des gaz, les pores, cependant, doivent être compris dans certaines limites.

124. Phénomènes d'absorption dans les plantes. — Dans le règne végétal, l'absorption se fait par toutes les parties des plantes, mais surtout par les spongioles ou chevelus qui terminent les racines, et par les feuilles. C'est par ces organes que sont absorbés, à l'état d'eau, d'acide carbonique et d'ammoniaque, l'oxygène, l'hydrogène, le carbone et l'azote nécessaires à la nutrition des végétaux.

Les liquides et les sels qu'ils tiennent en dissolution sont d'abord absorbés par les radicelles, par un double phénomène d'endosmose et de capillarité; puis, la séve, élaborée par le végétal, augmentant de densité vers les parties supérieures, c'est encore un phénomène d'endosmose qui lui donne une direction ascendante. Enfin, l'ascension de la séve est, en outre, favorisée par le vide qui tend à se produire dans les parties élevées de la plante par l'effet de l'exhalation par les feuilles. Quant à l'action capillaire, elle ne peut élever les liquides que dans les cellules inférieures, et ne peut produire de courant.

Le docteur Boucherie, de Bordeaux, a fait une heureuse application de la propriété absorbante des végétaux à l'introduction, dans le tissu des bois, de sels dont les uns leur donnent des couleurs plus ou moins vives, et dont les autres augmentent leur souplesse et leur ténacité, ou les rendent moins combustibles.

125. Phénomènes d'absorption dans les animaux. — Dans les animaux inférieurs, dont les tissus ne sont formés que de cellules, tout se passe, comme dans les végétaux, par imbibition et par endosmose. L'imbibition par laquelle quelques-uns de ces animaux se nourrissent est une véritable endosmose.

Dans les animaux supérieurs, il y a absorption. Par exemple, la garance, prise intérieurement par ces animaux, pénètre leurs os et les colore en rouge. De même, si un liquide est en contact avec une surface cutanée, dénudée de son épiderme, ou avec une membrane muqueuse, ces surfaces étant très-vasculaires, le liquide passe dans les vaisseaux par un effet d'endosmose, ce qui constitue l'absorption.

Plus une substance est liquide, plus elle est facilement absorbée. Toutefois, pour qu'il y ait absorption des liquides, il est nécessaire qu'ils mouillent les membranes. En effet, les graisses, qui ne les mouillent pas, ne sont pas absorbées. Mais M. Bernard a reconnu qu'elles le sont facilement étant émulsionnées avec le suc pancréatique. Récemment, le docteur Loze a observé qu'en émulsionnant de la même manière l'huile de foie de morue, ce médicament, très en vogue depuis quelques années, acquiert plus d'énergie, ce qui provient de ce qu'il est plus complétement absorbé.

L'absorption est favorisée, ainsi que l'endosmose, par la chaleur; elle l'est encore par la déplétion. Après une transpiration abondante ou une saignée, elle augmente.

LIVRE IV

DES GAZ

CHAPITRE PREMIER

PROPRIÉTÉ DES GAZ, ATMOSPHÈRE, BAROMÈTRES.

126. **Caractères physiques des gaz.** — Les *gaz*, ou *fluides aériformes*, sont des corps dont les molécules possèdent une mobilité parfaite, et sont dans un état constant de répulsion qu'on désigne sous les noms d'*expansibilité*, de *tension* ou de *force élastique*, d'où les gaz eux-mêmes prennent souvent le nom de *fluides élastiques*.

On divise les fluides élastiques en deux classes : les *gaz permanents*, ou gaz proprement dits, et les *gaz non permanents*, ou *vapeurs*. Les premiers sont ceux qui persistent à l'état aériforme, à quelque pression et à quelque abaissement de température qu'on le soumette ; ce sont l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, le bioxyde d'azote et l'oxyde de carbone. Les gaz non permanents, au contraire, passent plus ou moins facilement à l'état liquide, soit par un excès de pression, soit par le refroidissement. Toutefois, cette distinction n'est pas rigoureuse, car un grand nombre de gaz qu'on regardait comme permanents, ont été liquéfiés par M. Faraday ou par d'autres physiciens, et on doit admettre que ceux qui jusqu'ici n'ont pu être liquéfiés, le seraient si on les soumettait à une pression et à un froid suffisants. C'est pourquoi on donne, en général, le nom de *gaz* à des corps qui, dans les conditions habituelles de température et de pression, ne se présentent qu'à l'état aériforme ; tandis qu'on entend par *vapeur* l'état aériforme que prennent, sous l'influence du calorique, des corps qui, comme l'eau, l'alcool, l'éther, sont liquides aux pressions et aux températures ordinaires.

Les gaz connus aujourd'hui en chimie sont au nombre de 34,

dont 4 sont simples : ce sont l'oxygène, l'hydrogène, l'azote et le chlore; 7 seulement se rencontrent libres dans la nature, savoir : l'oxygène, l'azote, l'acide carbonique, le protocarbure et le bicarbure d'hydrogène, l'ammoniaque et l'acide sulfureux. Tous les autres ne s'obtiennent que par des réactions chimiques.

127. **Force expansive des gaz.** — La force expansive des gaz, c'est-à-dire leur tendance à prendre toujours un volume plus grand, se démontre par l'expérience suivante. On place, sous le récipient de la machine pneumatique, une vessie à robinet qui contient une petite quantité d'air, et qu'on a eu soin de mouiller pour la rendre plus flexible. Il y a d'abord équilibre entre la force élastique de l'air qui est sous le récipient et celle de l'air renfermé dans la vessie; mais aussitôt que l'on commence à faire le vide, la pression qui s'exerce sur la vessie s'affaiblit, et celle-ci se gonfle de plus en plus comme si l'on soufflait dedans (fig. 74), ce qui démontre la force élastique du gaz qu'elle contient. Lorsqu'on fait ensuite rentrer l'air extérieur au moyen d'un robinet destiné à cet usage, on voit la vessie, comprimée de nouveau par le gaz rentrant, reprendre son volume primitif. On constate de la même manière la force expansive de tous les gaz.

Fig. 74.

En vertu de sa force expansive, il semble qu'un gaz quelconque, contenu dans un vase ouvert, devrait s'en échapper instantanément. C'est, en effet, ce qui arriverait si le vase se trouvait dans le vide; mais, dans les circonstances ordinaires, la pression de l'air extérieur s'oppose à la sortie du gaz. Toutefois, hâtons-nous de dire que ceci n'est exact qu'autant que le fluide élastique contenu dans le vase est lui-même de l'air. En effet, l'expérience démontre qu'on ne peut faire équilibre à la force expansive d'un gaz, que par la pression qu'exerce une masse gazeuse de même nature que lui. Par exemple, la pression de l'air ne peut faire équilibre à la force expansive de l'hydrogène ou de l'acide carbonique. Ces gaz ne s'échappent pas alors comme ils le feraient dans le vide,

mais les fluides intérieur et extérieur se mélangent rapidement.

Il sera démontré plus tard que la force élastique des gaz est toujours égale et contraire à la pression qu'ils supportent, et qu'elle croît avec la température.

128. Transvasement des gaz. — De même que les liquides, les gaz peuvent être transvasés d'un vase dans un autre. L'expérience réussit très-bien avec l'acide carbonique, qui est beaucoup plus dense que l'air. On commence par remplir une cloche de ce gaz, en le recueillant sur une cuve à eau; puis, prenant une seconde cloche de même capacité et pleine d'air, on renverse la première cloche au-dessus, comme le montre la figure 75, et on les tient quelque temps immobiles. En vertu de son excès de densité, l'acide carbonique descend lentement de la cloche *m* dans la cloche *n*, dont il chasse l'air, en sorte que bientôt la cloche *n* est pleine d'acide carbonique et la cloche *m* l'est d'air. On le constate en s'appuyant sur la propriété de l'acide carbonique d'éteindre les corps en combustion. En effet, avant l'expérience, une bougie allumée brûle dans la cloche *n* et s'éteint dans l'autre, tandis qu'après l'expérience, c'est le contraire qui a lieu.

Fig. 75.

129. Poids des gaz. — Par leur extrême fluidité, par leur expansibilité surtout, les gaz semblent échapper aux lois de la pesanteur; mais ces fluides si subtiles obéissent à cette force, de même que les solides et les liquides. Pour le constater, on suspend, au-dessous du plateau d'une balance très-sensible, un ballon de verre de 3 à 4 litres, dont le col est garni d'un robinet fermant hermétiquement. On pèse d'abord ce ballon plein d'air; puis, après y avoir fait le vide au moyen de la machine pneumatique, on le pèse de nouveau, et on trouve que la seconde pesée est de plusieurs grammes plus faible que la première, ce qui fait connaître le poids de l'air retiré du ballon.

En jaugeant d'avance le volume du ballon en litres, on trouve, par ce procédé, qu'un litre d'air pur, à la température 0° et sous la pression atmosphérique 0m,76 (137), pèse gr. 1,3. Un litre d'hydrogène, qui est le plus léger des gaz, pèse gr. 0,09, c'est-à-dire

environ 14 fois $\frac{1}{2}$ moins que l'air; un litre de gaz iodhydrique, qui est le plus dense des gaz, pèse gr. 5,776.

130. **Pressions exercées par les gaz.** — Les gaz exercent sur les molécules de leur masse et sur les parois des vases qui les contiennent, des pressions qu'on peut considérer sous deux points de vue : 1° en faisant abstraction de la pesanteur; 2° en tenant compte de l'action de cette force. Si dans une masse gazeuse, en équilibre dans un vase, on fait abstraction de son poids pour n'avoir égard qu'à sa force expansive, les pressions dues à cette force se transmettent avec la même intensité sur tous les points des parois et de la masse fluide; car la force répulsive qui s'exerce entre les molécules est la même dans tous les points et agit également dans toutes les directions, ce qui est une conséquence de l'élasticité et de la fluidité parfaites des gaz. Mais si l'on a égard à l'action de la pesanteur, cette force fait naître des pressions soumises entièrement aux mêmes lois que les liquides (81); c'est-à-dire qu'elles croissent proportionnellement à la densité du gaz et à la profondeur; qu'elles sont constantes sur une même tranche horizontale et indépendantes de la forme qu'affecte la masse gazeuse. Quant à la force expansive du gaz, elle est alors, en chaque point, égale et contraire à la pression qu'il supporte, et croît, par conséquent, avec la profondeur. Pour une petite masse gazeuse, les pressions qui résultent de son poids sont très-faibles et peuvent être négligées; mais pour les grandes masses de gaz, comme l'atmosphère, les pressions dues à la pesanteur peuvent être considérables et il importe d'en tenir compte.

131. **Atmosphère, sa composition.** — On donne le nom d'*atmosphère* à la couche d'air qui enveloppe notre globe et est emportée avec lui dans l'espace.

L'air était regardé par les anciens comme un des quatre éléments qu'ils admettaient. La chimie moderne a fait voir qu'il est un mélange d'azote et d'oxygène, dans le rapport, en volume, de 20,80 d'oxygène à 79,20 d'azote. En poids, sa composition est de 23,01 d'oxygène pour 76,99 d'azote.

Il existe aussi, dans l'atmosphère, de la vapeur d'eau en quantité variable suivant la température, les saisons, les climats et la direction des vents. Enfin, l'air contient de 3 à 6 dix-millièmes de gaz acide carbonique en volume.

L'acide carbonique de l'air provient de la respiration des animaux, des combustions et de la décomposition des substances organiques. D'après M. Boussingault, il se produit à Paris, en 24 heu-

res, approximativement la quantité d'acide carbonique suivante :

Par la population et les animaux. . . .	336 777	mètres cubes.
Par les combustions diverses.	2 607 864	— —
Total.	2 944 641	mètres cubes.

Malgré cette production permanente d'acide carbonique à la surface du globe, la composition de l'atmosphère ne paraît pas se modifier, ce qui provient de ce que, dans l'acte de la végétation, les parties vertes des végétaux décomposent l'acide carbonique sous l'influence de la lumière solaire, s'assimilent son carbone, et restituent ainsi à l'atmosphère l'oxygène qui lui est constamment enlevé par la respiration des animaux et par les combustions.

132. **Pression atmosphérique.** — L'air étant pesant, il en résulte que, si l'on conçoit l'atmosphère partagée en tranches horizontales, les couches supérieures pressent, par leur poids, les couches inférieures et les compriment. Cette pression décroissant évidemment avec le nombre des tranches, l'air est d'autant plus raréfié qu'on s'élève davantage dans l'atmosphère.

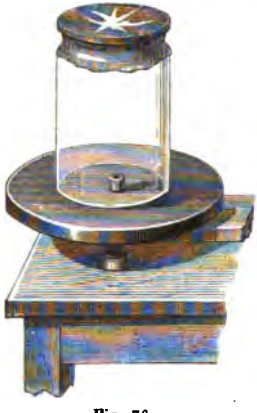


Fig. 76.

En vertu de la force expansive de l'air, il semble que les molécules de l'atmosphère devraient se répandre indéfiniment dans les espaces planétaires. Mais, par l'effet même de la dilatation, la force expansive de l'air décroît de plus en plus; elle est, en outre, affaiblie par la basse température des hautes régions de l'atmosphère, en sorte qu'il vient un moment où l'équilibre s'établit entre la force expansive des molécules de l'air et l'action de la pesanteur qui les sollicite vers le centre de la terre : d'où l'on conclut que l'atmosphère doit être limitée.

D'après le poids de l'atmosphère, son décroissement de densité, et l'observation des phénomènes crépusculaires, on évalue sa hauteur de 50 à 60 kilomètres. Au delà est un air extrêmement raréfié, et à 100 kilomètres environ on admet un vide absolu.

Puisqu'on a reconnu ci-dessus (129) qu'un litre d'air pèse 1gr., 3, on conçoit que l'ensemble de l'atmosphère doit exercer, à la sur-

face du globe, une pression considérable. On démontre l'existence de cette pression par les expériences suivantes.

133. **Crève-vessie.** — Le *crève-vessie* consiste en un manchon de verre fermé hermétiquement, à sa partie supérieure, par une membrane en baudruche. L'autre extrémité, dont les bords sont bien dressés et graissés de suif, s'applique sur le récipient de la machine pneumatique (fig. 76). Aussitôt qu'on commence à faire le vide dans ce manchon, la membrane se déprime sous la pression atmosphérique qu'elle supporte, et bientôt elle crève avec une vive détonation causée par la rentrée subite de l'air.

134. **Hémisphères de Magdebourg.** — Le crève-vessie ne démontre la pression atmosphérique que de haut en bas. Au moyen des *hémisphères de Magdebourg*, dus à Otto de Guéricke, et ainsi

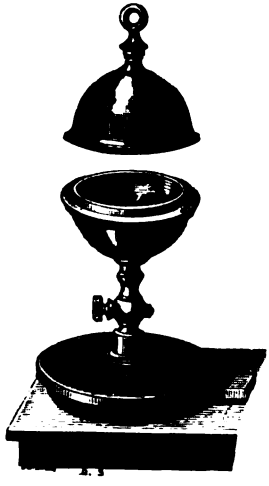


Fig. 77.

Fig. 78.

nommés de la ville où ils furent inventés, on démontre que cette pression se transmet en tous sens. Cet appareil est formé de deux hémisphères creux, en cuivre, de 10 à 12 centimètres de diamètre (fig. 77). Leurs bords sont garnis d'une rondelle annulaire de cuir, enduite de suif avec soin, afin de tenir le vide lorsque ces bords sont en contact. L'un des hémisphères porte un robinet qui peut se visser sur la platine de la machine pneumatique, et l'autre un

anneau qui sert de poignée pour le saisir et le tirer. Tant que les deux hémisphères, étant en contact, comprennent entre eux de l'air, on les sépare sans difficulté, car il y a équilibre entre la force expansive de l'air intérieur et la pression extérieure de l'atmosphère. Mais une fois que le vide est fait, on ne peut plus les séparer sans un puissant effort, dans quelque position qu'on tienne l'appareil (fig. 78), ce qui démontre que la pression atmosphérique s'exerce en tous sens.

MESURE DE LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE; BAROMÈTRES.

135. **Expérience de Torricelli.** — Les deux expériences précédentes démontrent l'existence de la pression atmosphérique, mais n'en font pas connaître la valeur. La suivante, faite, pour la première fois, en 1643, par Torricelli, disciple de Galilée, donne la mesure exacte du poids de l'atmosphère.

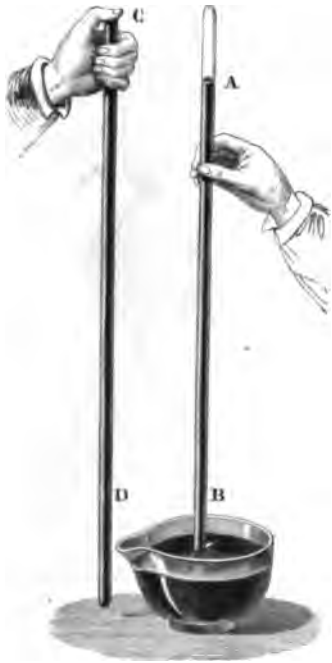


Fig. 79.

On prend un tube de verre long de 80 centimètres au moins, d'un diamètre intérieur de 6 à 7 millimètres, et fermé à l'une de ses extrémités. Ayant posé ce tube dans une position verticale CD (fig. 79), on le remplit entièrement de mercure; puis, fermant l'ouverture C avec le pouce, on retourne le tube et on plonge l'extrémité ouverte dans une cuvette remplie de mercure. Retirant alors le doigt, la colonne mercurielle s'abaisse aussitôt de plusieurs centimètres, et conserve une hauteur AB qui, au niveau des mers, est, en moyenne, de 76 centimètres.

Dans cette expérience, le vide se produisant au-dessus du niveau A du mercure, ce liquide, dans le tube, ne supporte aucune pres-

sion, tandis que dans la cuvette, il est soumis à la pression atmosphérique. C'est donc cette pression qui, pesant sur le mercure de la cuvette, soutient la colonne AB dans l'intérieur du tube; d'où l'on conclut que la pression atmosphérique équivaut, en moyenne, au poids d'une colonne de mercure qui aurait $0^m,76$ de hauteur; mais si le poids de l'atmosphère augmente ou diminue, on prévoit de suite qu'il doit en être de même de la colonne de mercure AB.

136. **Expériences de Pascal.** — Pascal, voulant constater que la force qui soutenait le mercure dans le tube de Torricelli était bien la pression de l'atmosphère, eut recours aux deux expériences suivantes : 1° prévoyant que la colonne de mercure devait baisser dans le tube, à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, parce qu'alors la pression diminue, il pria un de ses parents, habitant l'Auvergne, de répéter, sur le Puy-de-Dôme, l'expérience de Torricelli. Or, la colonne de mercure diminua d'environ 8 centimètres, ce qui démontre que c'est bien le poids de l'atmosphère qui soutient le mercure dans le tube, puisque, quand ce poids diminue, il en est de même de la colonne de mercure; 2° Pascal répéta l'expérience de Torricelli, à Rouen, en 1646, avec un autre liquide que le mercure. Il prit un tube de 15 mètres de long, fermé à un bout, il le remplit d'eau et le dressa verticalement dans un réservoir plein du même liquide; alors il observa que le liquide s'arrêtait, dans le tube, à une hauteur de $10^m,33$, c'est-à-dire 13,6 fois plus grande que celle du mercure; or, l'eau étant 13,6 fois plus dense que ce liquide, le poids de la colonne d'eau était égal à celui de la colonne de mercure dans l'expérience de Torricelli (90) : c'était donc bien la même force, la pression de l'atmosphère, qui soutenait successivement les deux liquides.

137. **Valeur de la pression atmosphérique en kilogrammes.** — D'après la hauteur à laquelle le mercure demeure en équilibre dans le tube de Torricelli, on peut facilement évaluer, en kilogrammes, la pression de l'atmosphère sur une surface donnée. Pour cela, admettons que la section intérieure du tube soit exactement d'un centimètre carré : la colonne de mercure, qui est dans le tube, ayant alors la forme d'un cylindre d'un centimètre carré de base et de 76 centimètres de hauteur, son volume sera de 76 centimètres cubes, puisqu'on sait qu'un cylindre a pour mesure le produit de sa base par sa hauteur. Or, un centimètre cube d'eau pesant 1 gramme, 1 centimètre cube de mercure doit peser $13^{gr},6$, puisque ce liquide est 13,6 fois plus dense que l'eau : d'où l'on conclut que le poids de la colonne de mercure, dans le tube que nous considérons, équi-

vaut à $13^{gr},6$ multipliés par 76, c'est-à-dire à 1033 grammes, ou, ce qui est la même chose, à 1 kilogramme et 33 grammes. Sur un décimètre carré, qui contient cent centimètres carrés, la pression atmosphérique est donc de $103^{kil},300^{gr}$, et sur un mètre carré, qui renferme 100 décimètres carrés, elle équivaut à 10330 kilogrammes.

Fig. 80. (h = 72.

La surface totale du corps humain, chez un sujet de taille et de grosseur ordinaires, étant d'un mètre carré et demi, la pression moyenne que supporte un homme, à la surface de la terre, est de 15500 kilogrammes. Il semble qu'une pression aussi considérable devrait nous écraser; mais notre corps y résiste par la réaction des fluides élastiques qu'il renferme. Nos membres n'en éprouvent même aucune gêne dans leurs mouvements, parce que la pression atmosphérique s'exerçant dans toutes les directions, nous supportons en tout sens, des pressions égales et contraires qui se font équilibre et sont plus propres à nous soutenir qu'à nous gêner. En effet, les jours où la pression atmosphérique est plus faible, nous éprouvons un malaise qui nous fait dire que le *temps est lourd*; c'est le contraire qu'il faudrait dire.

138. **Différentes espèces de baromètres.** — On nomme *baromètres* des instruments propres à mesurer la pression atmosphérique. Dans les baromètres ordinaires, cette pression est mesurée par la hauteur d'une colonne de mercure dans un tube de verre, comme dans l'expérience de Torricelli; tels sont les baromètres que nous allons décrire et qui se divisent en baromètre à cuvette, baromètre à siphon et baromètre à cadran. Mais on construit aussi des baromètres sans mercure. Nous en ferons bientôt connaître un de ce genre (156), celui de M. Bourdon, remarquable par sa simplicité et son petit volume.

139. **Baromètre à cuvette.** — Le *baromètre à cuvette* se compose d'un tube de verre droit, de 85 centimètres environ de longueur, rempli de mercure, et plongeant dans une cuvette pleine de ce métal. Tel est l'appareil déjà décrit sous le nom de tube de Torricelli (fig. 79). Dans le but de rendre le baromètre plus por-

tatif et les variations du niveau dans la cuvette moins sensibles lorsque le mercure s'élève ou s'abaisse dans le tube, on a varié beaucoup la forme de la cuvette. La figure 80 représente un baromètre de ce genre qui peut se transporter facilement.

La cuvette est à deux compartiments *m* et *n*, dont le plus grand est mastiqué au tube et ne communique à l'atmosphère que par une petite ouverture recouverte d'une rondelle de peau *a*, qu'on voit représentée sur la paroi supérieure de la cuvette, près du tube. Au-dessous du premier compartiment est le plus petit *n*, complétement rempli de mercure, le premier ne l'étant qu'en partie. Ces deux compartiments sont réunis par une partie étranglée dans laquelle s'engage le bout inférieur du tube barométrique A. Ce dernier ne ferme pas la tubulure qui réunit les deux compartiments, mais il laisse entre les parois de celle-ci et les siennes un intervalle assez petit pour que la capillarité ne permette pas au mercure du petit compartiment de s'échapper lorsqu'on incline ou qu'on retourne le baromètre ; par conséquent, dans toutes les positions, la pointe effilée du tube plonge dans le mercure, et dès lors l'air ne peut y pénétrer.

Tout l'appareil est fixé sur une planchette en acajou, qui porte, à la partie supérieure, une échelle graduée en millimètres à partir du niveau du mercure dans la cuvette ; enfin, un curseur mobile *i*, au haut du tube, sert à constater, sur l'échelle, le niveau *o* du mercure.

Ce baromètre, ainsi que tous ceux du même genre, offre peu de précision, par la raison que le zéro de l'échelle ne correspond pas invariablement au niveau du mercure dans la cuvette. En effet, la pression de l'atmosphère n'étant pas constante, ce niveau varie toutes les fois que cette pression augmente ou diminue, car alors une certaine quantité de mercure passe de la cuvette dans le tube, ou de celui-ci dans la cuvette, d'où il résulte que, dans la plupart des cas, la graduation de l'échelle n'indique pas la vraie hauteur du baromètre. On verra ci-après comment cette cause d'erreur est évitée dans le baromètre de Fortin.

On nomme *hauteur* du baromètre la différence de niveau du mercure dans le tube et dans la cuvette. Comme la pression que le mercure exerce par son poids, à la base du tube, est indépendante de la forme de celui-ci et de son diamètre (83), pourvu qu'il ne soit pas capillaire, la hauteur du baromètre est elle-même indépendante du diamètre du tube et de sa forme droite ou courbe ; mais cette hauteur est en raison inverse de la densité du liquide. Avec le mercure, la hauteur moyenne, au niveau de la mer,

est de $0^m,76$; dans un baromètre à eau, elle serait de $10^m,33$.

140. **Baromètre de Fortin.** — Le *baromètre de Fortin*, ainsi appelé du nom de son inventeur, est un baromètre à cuvette; mais celle-ci diffère de la cuvette du baromètre déjà décrit (139). Le fond en est en peau de daim, et peut s'élever ou s'abaisser au moyen d'une vis de pression placée au-dessous, ce qui offre deux avantages : celui de pouvoir obtenir un niveau constant dans la cuvette, et celui de rendre l'instrument plus portatif. En effet, pour le transporter en voyage, il suffit de soulever la peau de daim jusqu'à ce que, le mercure remontant avec elle, le tube et la cuvette soient complétement remplis ; le baromètre peut alors être incliné et même retourné sans qu'on ait à craindre qu'il y rentre de l'air ou que le choc du mercure vienne briser le tube.

Fig. 81.

Fig. 82.

La figure 81 représente l'ensemble de ce baromètre, dont le tube est renfermé dans un étui de cuivre destiné à le protéger. Cet étui, fendu vers sa partie supérieure, y présente deux fenêtres longitudinales, opposées l'une à l'autre, afin de laisser voir le niveau B du mercure. Sur l'étui est une échelle graduée en millimètres. Un curseur A, qu'on fait marcher à la main, donne, au moyen d'un vernier, la hauteur du baromètre à $\frac{1}{10}$ de millimètre près. A la partie inférieure de l'étui est fixée la cuvette *b*, contenant le mercure O.

La figure 82 montre, sur une plus grande échelle, les détails de la cuvette. Celle-ci est formée d'un cylindre de verre *ei*, qui laisse voir le niveau du mercure. Le fond de ce cylindre est fermé par une peau de daim *mn*, qu'on soulève ou qu'on abaisse à l'aide d'une vis C. L'écrou de cette vis est taraudé dans le fond d'un cylindre de cuivre G, qui se trouve fixé au-dessous du cylindre de verre dans lequel est le mercure. Enfin, à la paroi supérieure de la cuvette est fixée une petite tige d'ivoire *a*, dont la pointe cor-

respond exactement au zéro de l'échelle qui est graduée sur l'étui. A sa partie supérieure, la cuvette est fermée par une peau de daim *d*, liée d'un côté au tube barométrique E, de l'autre à une tubulure fixée à un plateau de cuivre qui recouvre la cuvette. La pression atmosphérique s'exerce à travers les pores de cette peau. Pour faire usage de l'instrument, on a soin, à chaque observation, de faire affleurer la surface du mercure, dans la cuvette, avec la pointe *a*, ce qui s'obtient en tournant la vis C dans un sens ou dans l'autre. De la sorte, la distance du sommet B de la colonne de mercure à la pointe d'ivoire *a* (fig. 81) représente exactement la hauteur du baromètre.

Fig. 83.

141. Baromètre à siphon de Gay-Lussac. — Le *baromètre à siphon* consiste en un tube de verre recourbé en deux branches inégales : la plus grande, qui est fermée à son sommet, est remplie de mercure de même que dans le baromètre à cuvette; la plus petite, qui est ouverte, tient lieu de cuvette. La différence de niveau dans les deux branches est la hauteur du baromètre.

Fig. 84.

La figure 83 représente le baromètre à siphon tel qu'il a été modifié par Gay-Lussac. Ce physicien, afin de rendre l'instrument plus facile à transporter en voyage, sans que l'air puisse y pénétrer, a réuni les deux branches par un tube capillaire, représenté ci-contre à la partie inférieure du baromètre. Lorsqu'on retourne l'instrument, ce tube, en vertu de la capillarité, reste toujours plein, et l'air ne peut pénétrer dans la grande branche. Cependant, par un choc trop brusque, la colonne de mercure qui est dans le tube capillaire peut se diviser et laisser passer de l'air. Pour obvier à cet inconvénient, M. Bunten a adopté la modification représentée dans la figure 84. Le tube capillaire, au lieu d'être soudé à la grande branche, l'est à un tube K, d'un fort diamètre, dans lequel pénètre cette branche en forme de pointe effilée. Par cette disposition, s'il passe des bulles d'air dans le tube capillaire,

elles ne peuvent s'engager dans la pointe effilée du tube, et viennent se loger au-dessus de K, à la partie la plus élevée du renflement, comme le montre la figure; là, elles ne nuisent en rien à l'instrument, puisque le vide existe toujours au sommet.

Dans le baromètre de Gay-Lussac, la courte branche est fermée à son extrémité supérieure et ne porte qu'une petite ouverture latérale *a*, par laquelle pénètre la pression atmosphérique.

Quant à la mesure de la hauteur, on la prend au moyen de deux échelles ayant leur zéro commun en O, vers le milieu de la grande branche, et graduées en sens contraire, l'une de O vers E, l'autre de O vers B, sur deux règles de cuivre parallèles au tube barométrique. Deux curseurs à vernier *m* et *n* peuvent glisser sur les échelles, de manière à y indiquer les nombres de millimètres et de dixièmes de millimètre contenus de O à A et de O à B. Faisant, enfin, la somme des deux nombres ainsi obtenus, on a la hauteur totale AB.

La figure 83 représente le baromètre de Gay-Lussac fixé sur une planchette d'acajou, ce qui le rend plus propre à la démonstration. Mais, pour voyager, on l'enferme dans un étui en cuivre entièrement semblable à celui du baromètre de Fortin (fig. 81), moins la cuvette.

142. Conditions auxquelles doit satisfaire un baromètre. — Dans la construction d'un baromètre, on doit faire choix du mercure, de préférence à tout autre liquide, parce que, étant le plus dense des liquides, c'est celui qui prend la moindre hauteur; mais il mérite encore cette préférence à cause de sa faible volatilité et parce qu'il ne mouille pas le verre. Il importe que le mercure soit parfaitement pur et exempt d'oxyde; autrement *il fait la queue*, c'est-à-dire adhère au verre et le ternit. De plus, s'il est impur, sa densité est changée et la hauteur du baromètre est trop grande ou trop petite.

Dans tout baromètre, il faut que l'espace vide qui se trouve au sommet du tube (fig. 79 et 80), et qu'on nomme *chambre barométrique*, ou *vide de Torricelli*, soit complétement purgé d'air et de vapeur d'eau, sinon ces fluides, en vertu de leur force élastique, déprimeraient la colonne de mercure. Pour obtenir ce résultat, on ne verse d'abord dans le tube qu'une partie du mercure destiné à le remplir, et on chauffe jusqu'à ce que le liquide se maintienne quelque temps en ébullition; on laisse ensuite refroidir et on verse de nouveau du mercure qu'on fait bouillir de la même manière, et ainsi de suite jusqu'à ce que le tube soit plein. De cette manière,

l'air et l'humidité qui adhéraient aux parois du tube sont entraînés par les vapeurs de mercure.

On reconnaît qu'un baromètre est bien purgé d'air et d'humidité, lorsque, incliné doucement, il rend un son sec et métallique produit par le mercure qui vient frapper le sommet du tube. S'il y a de l'air ou de l'humidité dans l'instrument, le son est amorti.

143. **Correction relative à la capillarité.** — Dans les baromètres à cuvette, il y a toujours une certaine dépression dans la hauteur du mercure, laquelle est due à la capillarité. Pour corriger cette erreur, il faut connaître le diamètre intérieur du tube barométrique, et alors, au moyen du tableau donné au paragraphe 114, on détermine la dépression qui doit constamment s'ajouter aux hauteurs observées. Lorsque le diamètre intérieur n'est pas connu d'avance, on le déduit approximativement du diamètre extérieur, en retranchant de celui-ci $2^{mill.},3$, s'il est de 8 à 10 millimètres, et $2^{mill.},5$, s'il est de 10 à 12 millimètres. Pour un tube de 20 millimètres de diamètre, à l'intérieur, l'erreur provenant de la capillarité serait négligeable.

Dans le baromètre de Gay-Lussac (fig. 83), on évite la correction de capillarité, en ayant soin que les deux branches A et B soient de même diamètre, car alors, les dépressions en A et en B étant égales, la colonne AB conserve sa vraie longueur.

144. **Correction relative à la température.** — Dans toutes les observations faites avec les baromètres, soit à cuvette, soit à siphon, il faut avoir égard à la température. En effet, le mercure se dilatant ou se contractant par les variations de température, sa densité change, et, par suite, sa hauteur, puisque cette hauteur est en raison inverse de la densité du liquide renfermé dans le tube (139); en sorte que, pour des pressions atmosphériques différentes, on pourrait avoir des hauteurs égales dans le baromètre. Il importe donc, à chaque observation, de ramener toujours la hauteur à ce qu'elle serait à une température déterminée et invariable. Celle-ci étant tout à fait arbitraire, on a choisi la température de la glace fondante. On verra, dans l'étude de la chaleur (262), comment se fait cette correction par le calcul. C'est pour connaître la température du mercure dans le baromètre qu'on place un thermomètre près du tube, ainsi que le représentent les figures 81 et 83.

On peut aussi, par un calcul très-simple, ramener à zéro la hauteur du baromètre, au moyen de tables de correction qui ont été construites à cet usage. Ces tables se trouvent dans l'Annuaire du Bureau des longitudes, année 1838.

145. **Variations de la hauteur barométrique.** — Lorsqu'on observe le baromètre pendant plusieurs jours, on remarque que sa hauteur varie, en chaque lieu, non-seulement d'un jour à l'autre, mais encore dans une même journée.

L'amplitude des variations, c'est-à-dire la différence moyenne entre la plus grande et la plus petite hauteur, n'est pas partout la même. Elle croît de l'équateur vers les pôles. Les plus grandes variations, sauf les cas extraordinaires, sont de 6 millimètres sous l'équateur, de 30 sous le tropique du Cancer, de 40 en France, à la latitude moyenne, et de 60, à 25 degrés du pôle. Enfin, les plus fortes variations ont lieu en hiver.

On nomme *hauteur moyenne diurne* le nombre qu'on obtient en faisant la somme de 24 observations successives du baromètre, prises d'heure en heure, et en divisant cette somme par 24. Ramond a constaté, par l'observation, qu'à notre latitude, la hauteur du baromètre, à midi, est sensiblement la moyenne du jour.

La *hauteur moyenne mensuelle* s'obtient en additionnant les hauteurs moyennes diurnes pendant un mois, et en divisant par 30.

Enfin, la *hauteur moyenne de l'année* se détermine en ajoutant les hauteurs moyennes de chaque jour pendant un an, et en divisant la somme par 365.

Sous l'équateur, la moyenne annuelle, au niveau des mers, est $0^m,758$. Elle augmente à partir de l'équateur et atteint, entre les latitudes de 30 à 40 degrés, un maximum de $0^m,763$. Elle décroît dans les latitudes plus élevées, et, à Paris, elle n'est plus que de $0^m,7568$.

La moyenne générale, au niveau des mers, paraît être $0^m,761$.

La moyenne mensuelle est plus forte en hiver qu'en été; ce qui est une conséquence du refroidissement de l'atmosphère.

On distingue, dans le baromètre, deux sortes de variations : 1° les *variations accidentelles*, qui n'offrent aucune régularité dans leur marche, et qui dépendent des saisons, de la direction des vents et de la position géographique : ce sont celles qu'on observe surtout dans nos climats; 2° les *variations diurnes*, qui se produisent périodiquement à certaines heures de la journée.

A l'équateur et dans les régions intertropicales, on ne remarque pas de variations accidentelles; mais les variations diurnes s'y produisent avec une telle régularité, qu'un baromètre y pourrait en quelque sorte servir d'horloge. Depuis midi, le baromètre baisse jusque vers 4 heures. A cette heure il atteint un minimum; puis

il remonte et atteint un maximum vers 10 heures du soir. Enfin, il baisse de nouveau, atteint un second minimum vers 4 heures du matin, et un second maximum vers 10 heures.

Dans les zones tempérées, il y a aussi des variations diurnes; mais elles sont plus difficiles à constater qu'à l'équateur, parce qu'elles se confondent avec les variations accidentelles.

Les heures des maxima et des minima des variations diurnes paraissent être les mêmes dans tous les climats, quelle que soit la latitude; seulement elles varient un peu avec les saisons.

146. **Causes des variations barométriques.** — On remarque que la marche du baromètre est, en général, en sens contraire de celle du thermomètre; c'est-à-dire que, la température s'élevant, le baromètre baisse, et *vice versâ*, ce qui indique que les variations barométriques, dans un lieu déterminé, résultent des dilatations ou des contractions de l'air en ce lieu, et, par conséquent, de ses changements de densité. Si la température de l'air était constante et uniforme dans toute l'étendue de l'atmosphère, il ne se produirait, dans le sein de celle-ci, aucun courant, et la pression atmosphérique, à hauteur égale, serait invariable et partout la même. Mais lorsqu'une certaine région de l'atmosphère s'échauffe plus que les régions voisines, l'air dilaté s'élève en vertu de sa légèreté spécifique, et s'écoule par les hautes régions de l'atmosphère; d'où il résulte que la pression décroît et que le baromètre baisse. Le même effet se produirait si, une région de l'atmosphère conservant la même température, les régions voisines se refroidissaient; car, alors, l'air de la première s'élèverait encore en vertu de sa moindre densité. Aussi arrive-t-il ordinairement, qu'une baisse extraordinaire sur un point du globe est compensée par une hausse semblable sur un autre point.

Quant aux variations diurnes, elles paraissent résulter des dilatations et des contractions qui se produisent périodiquement dans l'atmosphère par l'effet de l'action calorifique du soleil pendant la rotation de la terre.

147. **Relation entre les variations barométriques et l'état du ciel.** — On remarque, dans nos climats, que le baromètre se tient communément, par le beau temps, au-dessus de $0^m,758$; au-dessous de ce point, dans les temps de pluie, de neige, de vent ou d'orage; et, enfin, que sur un certain nombre de jours où le baromètre marque $0^m,758$, il y a, en moyenne, autant de jours de beau temps que de jours de pluie. C'est d'après cette coïncidence entre la hauteur du baromètre et l'état du ciel qu'on a marqué les indications

suivantes sur le baromètre, en comptant de 9 en 9 millimètres, au-dessus et au-dessous de 0m,758.

Hauteur.		État de l'atmosphère.
731	millimètres.....	tempête.
740	—	grande pluie.
749	—	pluie ou vent.
758	—	variable.
767	—	beau temps.
776	—	beau fixe.
785	—	très-sec.

En consultant le baromètre, comme instrument propre à annoncer les changements de *temps*, il ne faut pas perdre de vue qu'il n'est réellement destiné qu'à mesurer le poids de l'air, et qu'il ne monte ou descend qu'autant que ce poids augmente ou diminue. Or, de ce que les changements de temps coïncident le plus souvent avec les variations de pression, cela ne veut pas dire qu'ils y soient invariablement liés. Cette coïncidence tient à des conditions météorologiques particulières à notre climat, et elle n'est pas sans offrir d'exceptions. Si l'abaissement du baromètre précède ordinairement la pluie dans nos contrées, cela tient à la position de l'Europe. En effet, les vents du sud-ouest, qui sont les plus chauds, et par conséquent les moins lourds, font baisser le baromètre; mais, en même temps, comme ils se sont chargés de vapeur d'eau en traversant l'Océan, ils nous apportent la pluie. Les vents du nord et du nord-est, au contraire, étant froids et plus denses, font monter le baromètre; mais comme ils ne nous arrivent qu'après avoir traversé de vastes continents, ils sont desséchés et accompagnés en général d'un ciel pur et serein.

Les vents chauds du sud-ouest tendent à augmenter la pression atmosphérique par le poids et la tension de la vapeur qu'ils contiennent, mais en même temps ils tendent à l'abaisser par leur dilatation. Cette dernière influence étant la plus énergique, il en résulte qu'en définitive, c'est à cause de l'élévation de la température que les vents de mer, dans nos climats, font descendre le baromètre. Des vents de mer froids produiraient l'effet contraire. A l'embouchure de la Plata, par exemple, le baromètre se tient plus haut par les vents de mer orientaux que par les vents d'ouest qui soufflent de terre, ce qui s'explique par la température élevée

de ces derniers vents. Nous ignorons les indications du baromètre en Égypte, mais on prévoit d'avance que les vents qui soufflent du golfe Persique, étant chauds et humides, doivent faire descendre le baromètre et donner de la pluie; qu'au contraire, les vents du sud-ouest, qui sont chauds et ont traversé le désert, doivent faire descendre encore le baromètre, mais donner de la sécheresse.

Lorsque le baromètre monte ou descend lentement, c'est-à-dire pendant deux ou trois jours, vers le beau temps ou vers la pluie, il résulte d'un grand nombre d'observations que les indications fournies par cet instrument sont alors extrêmement probables. Quant aux variations brusques, dans l'un ou l'autre sens, elles présagent le mauvais temps ou le vent.

Si l'on a égard aux remarques précédentes, ainsi qu'à la direction des vents et à la température de l'air, on peut tirer du baromètre d'utiles indications, particulièrement pour l'agriculture. Mais il faut observer que le tableau indicateur donné ci-dessus est le résultat d'anciennes observations faites à Paris. Or, la plupart des constructeurs de baromètres ont adopté uniformément les mêmes indications pour toute la France et pour tous les pays de la terre. Il en est résulté que, pour des lieux plus élevés que Paris, ou situés dans des conditions géographiques différentes, les baromètres n'ont fourni que des indications complétement fausses; mais ce n'est pas à ces instruments qu'il faut s'en prendre, c'est à ceux qui les fabriquent ou qui les consultent. Dans chaque pays, les indications du baromètre étant modifiées par la position géographique, il importe de tenir compte de celle-ci, si l'on veut avoir des indications exactes.

* 148. **Baromètre à cadran.** — Le *baromètre à cadran*, dû à Hook, est un baromètre à siphon qui est surtout destiné à indiquer le beau et le mauvais temps. Il est ainsi nommé parce qu'il est muni d'un cadran sur lequel se meut une longue aiguille (fig. 85) qui est mise en mouvement par le mercure même de l'instrument, au moyen d'un mécanisme représenté dans la figure 86. A l'axe de l'aiguille est fixée une poulie O, sur laquelle s'enroule un fil qui porte, à l'une de ses extrémités, un poids P, et, à l'autre, un flotteur un peu plus pesant que ce poids et soutenu par le mercure de la petite branche du tube barométrique. Si la pression atmosphérique vient à augmenter, le niveau baisse dans la petite branche, le flotteur descend et entraîne la poulie et l'aiguille de gauche à droite. Le mouvement contraire a lieu quand la pression diminue.

parce que le mercure s'élève dans la petite branche, et remonte en même temps le flotteur. Il résulte de là que l'aiguille s'arrête aux mots *variable*, *pluie*, *beau temps*, etc., lorsque le baromètre prend les hauteurs correspondantes, pourvu, toutefois, que l'instrument soit bien réglé; or, cette condition est rarement satisfaite dans ceux qu'on trouve dans le commerce.

Fig. 85.

Fig. 86.

149. Mesure des hauteurs par le baromètre. — La pression de l'atmosphère décroissant à mesure qu'on atteint des lieux élevés, il en résulte que le baromètre baisse d'autant plus qu'il est porté à une plus grande hauteur, ce qui permet d'utiliser cet instrument pour mesurer la hauteur des montagnes.

Si la densité de l'air restait la même dans toutes les couches de l'atmosphère, on déduirait, par un calcul très-simple, la hauteur dont on s'est élevé, de la quantité dont le baromètre se serait abaissé. En effet, la densité de l'air étant 10466 fois plus petite que celle du mercure, si le baromètre s'abaissait, par exemple, de 1 millimètre, cela indiquerait que la colonne d'air, qui fait équilibre au mercure, a diminué 10466 fois plus, c'est-à-dire de 1 millimètre multiplié par 10466, ou $10^{m},466$. Telle serait donc la hauteur dont on se serait élevé. Si la dépression du mercure était de 2, 3... millimètres, on en conclurait de même que l'ascension aurait été de deux fois, trois fois... $10^{m},466$. Mais comme la densité de l'air décroît lorsqu'on s'élève dans l'atmosphère, le calcul ci-dessus ne peut s'appliquer qu'à de petites hauteurs.

Pour mesurer la hauteur des montagnes, à l'aide du baromètre, Laplace a donné la formule

$$D = 18393\,(1 + 0{,}002837 \cos 2\varphi)\left[1 + \frac{2\,(T + t)}{1000}\right] \log.\ \frac{H}{h},$$

dans laquelle D désignant la distance verticale entre les deux lieux dont on cherche la différence de niveau, H représente la hauteur du baromètre à la station inférieure, et h la hauteur à la station supérieure; T et t sont les températures de l'air correspondantes à chaque observation; φ est la latitude.

Pour la latitude de 45°, $\cos 2\varphi = 0$, et la formule devient

$$D = 18393\left[1 + \frac{2\,(T + t)}{1000}\right] \log.\ \frac{H}{h}.$$

Pour des hauteurs moindres que 1000 mètres, M. Babinet a proposé récemment la formule

$$D = 16000^{m}\left(\frac{H - h}{H + h}\right)\left[1 + \frac{2\,(T + t)}{1000}\right]$$

qui dispense de l'usage des logarithmes.

M. Oltmanns a construit des tables à l'aide desquelles on calcule très-simplement la différence de niveau entre deux stations, lorsqu'on connaît les hauteurs H et h du baromètre à la station inférieure et à la station supérieure, ainsi que les températures T et t aux mêmes stations. On trouve ces tables et la manière de s'en servir dans les Annuaires du Bureau des longitudes.

Si la hauteur à mesurer n'est pas très-grande, on peut opérer seul; mais si elle est un peu considérable et exige un temps d'ascension un peu long, pendant lequel la pression atmosphérique peut varier, il faut être deux et avoir deux baromètres bien d'accord. L'un des observateurs reste au pied de la montagne, l'autre se transporte au sommet; puis, à une heure donnée, ils observent simultanément le baromètre; en sorte que la différence des colonnes est bien due tout entière à la différence des niveaux.

CHAPITRE II

MESURE DE LA FORCE ÉLASTIQUE DES GAZ.

150. Loi de Mariotte. — L'abbé Mariotte, physicien français, mort en 1684, posa, le premier, la loi suivante sur la compressi-

bilité des gaz : *La température restant la même, le volume d'une masse donnée de gaz est en raison inverse de la pression qu'elle supporte.*

Cette loi se vérifie, pour l'air, au moyen de l'appareil suivant, connu sous le nom de *tube de Mariotte.* Sur une planchette de bois, maintenue verticalement, est fixé un tube de verre recourbé en siphon, dont les deux branches sont inégales (fig. 87). Le long de la petite branche, qui est fermée, est une échelle indiquant des capacités égales, tandis que l'échelle placée le long de la grande branche indique les hauteurs en centimètres. Les zéros des deux échelles sont sur une même ligne horizontale.

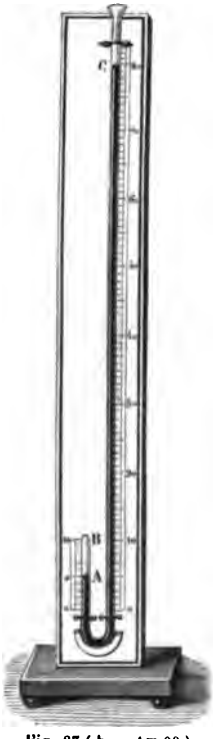


Fig. 87 (h = 1m 00).

Pour faire l'expérience, on introduit d'abord du mercure dans l'appareil par le sommet de la grande branche, de manière que le niveau du liquide corresponde au zéro dans les deux branches, ce qu'on obtient après quelques tâtonnements. L'air renfermé dans la courte branche est alors soumis à la pression atmosphérique qui s'exerce, dans la grande, sur la surface du mercure, sinon le niveau ne serait pas le même. On verse enfin du mercure dans le grand tube jusqu'à ce que la pression qui en résulte réduise de moitié le volume d'air renfermé dans la petite branche, c'est-à-dire jusqu'à ce que ce volume, qui était 10 d'abord, ne soit plus que 5, ainsi que le montre la figure ci-contre. Mesurant alors la différence de niveau CA du mercure dans les deux tubes, on trouve qu'elle est précisément égale à la hauteur du baromètre au moment où l'on expérimente. La pression de la colonne CA équivaut donc à une atmosphère. En y ajoutant la pression atmosphérique qui s'exerce en C, au sommet de la colonne, on voit qu'au moment où le volume d'air s'est réduit de moitié, la pression est double de ce qu'elle était d'abord, ce qui démontre la loi.

Si la grande branche est assez longue pour qu'on puisse y verser du mercure jusqu'à ce que le volume d'air de la courte branche se

reduise au tiers de ce qu'il était d'abord, on trouve que la différence de niveau, dans les deux tubes, est égale à deux fois la hauteur du baromètre, c'est-à-dire qu'elle équivaut à deux pressions atmosphériques, qui, s'ajoutant à celle qui s'exerce directement sur la surface du mercure dans le grand tube, donnent une pression de trois atmosphères. C'est donc sous une pression triple que le volume d'air est devenu trois fois moindre. La loi de Mariotte a été vérifiée ainsi, pour l'air, jusqu'à 27 atmosphères, par Dulong et Arago, au moyen d'un appareil analogue à celui qui vient d'être décrit.

Fig. 88.

La loi de Mariotte se vérifie aussi pour des pressions moindres que celles d'une atmosphère. A cet effet, on remplit de mercure, jusqu'aux deux tiers environ, un tube gradué, le reste contenant de l'air; puis on le retourne et on le plonge dans une éprouvette profonde, pleine de mercure (fig. 88); enfonçant ensuite le tube jusqu'à ce que le niveau du mercure soit le même à l'intérieur qu'à l'extérieur, on lit, sur le tube, quel est le volume d'air qu'il contient. Cela posé, on soulève le tube, comme le représente la figure, jusqu'à ce que, par la diminution de pression le volume d'air soit doublé. Or, on trouve alors que le mercure s'élève dans le tube A, et que la hauteur qu'il atteint est la moitié de celle du baromètre. L'air, dont le volume a doublé, n'est donc plus qu'à une demi-pression atmosphérique, car c'est la force élastique de cet air qui, jointe au poids de la colonne soulevée, fait équilibre à la pression atmosphérique extérieure. Le volume est donc bien encore en raison inverse de la pression.

Dans l'expérience du tube de Mariotte, la masse d'air renfermée dans le tube restant la même, sa densité devient nécessairement d'autant plus grande que son volume est réduit davantage, d'où l'on déduit, comme conséquence de la loi de Mariotte, le principe

suivant : *Pour une même température, la densité d'un gaz est proportionnelle à la pression qu'il supporte.* Par conséquent, sous la pression ordinaire de l'atmosphère, la densité de l'air étant 770 fois moindre que celle de l'eau, sous une pression de 770 atmosphères l'air aurait la même densité que l'eau, si, à une telle pression, il était encore gazeux, ce qu'on ignore.

On avait admis, jusqu'à ces dernières années, la loi de Mariotte d'une manière absolue pour tous les gaz et à toutes les pressions. M. Despretz fit voir, le premier, que l'acide carbonique, l'hydrogène sulfuré, l'ammoniaque et le cyanogène sont plus compressibles que l'air, et que l'hydrogène se comportant d'abord comme l'air jusqu'à une pression de 15 atmosphères, est ensuite moins compressible. Les expériences de M. Despretz ayant fait voir que tous les gaz ne sont pas également compressibles, on en conclut que la loi de Mariotte n'était pas générale.

Cette loi venait ainsi d'être trouvée en défaut, quand Dulong et Arago entreprirent sur la force élastique de la vapeur d'eau des recherches dans lesquelles ils devaient faire usage d'un manomètre à air comprimé (154) pour mesurer la tension. Or, voulant à ce sujet, s'assurer de l'exactitude de leur manomètre, ils le graduèrent non pas d'après la loi de Mariotte, mais en soumettant directement l'air renfermé dans le manomètre à des pressions de plus en plus grandes, à l'aide d'un tube de 25 mètres de hauteur, dans lequel on versait progressivement du mercure, et qui, joint au manomètre, constituait un véritable tube de Mariotte, sauf les détails de construction. Les deux physiciens, ayant expérimenté jusqu'à 27 atmosphères, observèrent que le volume de l'air diminuait toujours un peu plus que ne l'indiquait la loi de Mariotte; mais les différences étant très-petites, ils les attribuèrent à des erreurs d'observation, et admirent que cette loi était rigoureusement exacte pour l'air, du moins jusqu'à 27 atmosphères de pression, limite de leurs expériences.

Enfin, M. Regnault, en 1847, publia des expériences sur la compressibilité des gaz faites avec un appareil qui avait beaucoup de rapport avec celui de Dulong et Arago, mais dans lequel on avait tenu compte de toutes les causes d'erreur, et fait les observations avec une précision extrême. Or, ayant expérimenté sur l'air, l'azote, l'acide carbonique et l'hydrogène, M. Regnault constata d'abord que l'air ne suit pas rigoureusement la loi de Mariotte, mais se comprime plus qu'elle ne l'indique, et que de plus sa compressibilité augmente avec la pression; c'est-à-dire que les résul-

tats obtenus par l'observation et ceux déduits de la loi de Mariotte, diffèrent d'autant plus que la pression est plus forte.

M. Regnault a trouvé que l'azote se comporte comme l'air, seulement il est moins compressible; quant à l'acide carbonique, ce gaz s'éloigne beaucoup de la loi de Mariotte lorsque les pressions sont un peu considérables. Enfin, l'hydrogène s'en écarte aussi, mais sa compressibilité, au lieu d'augmenter avec la pression, diminue.

M. Regnault a encore observé sur l'acide carbonique, que ce gaz s'éloigne d'autant moins de la loi de Mariotte que la température est plus élevée, et on admet en général qu'il en est ainsi pour les autres gaz. En effet, l'expérience montre que les gaz diffèrent d'autant plus de cette loi qu'ils sont plus près de leur point de liquéfaction, et qu'au contraire en s'éloignant de ce point, la compressibilité tend de plus en plus à devenir proportionnelle à la pression. Du reste, ajoutons que pour tous les gaz qui n'ont pu être liquéfiés, les écarts entre la loi de Mariotte et l'observation sont extrêmement faibles et tout à fait négligeables dans les expériences de physique et de chimie, lorsqu'on n'y considère que des pressions peu considérables, comme c'est le cas ordinaire.

151. Applications de la loi de Mariotte. — Les problèmes suivants, sur la loi de Mariotte, sont d'un fréquent usage en physique et en chimie.

I. Un vase, à parois compressibles, contient 4 lit., 3 d'air, la pression étant $0^m,74$; quel serait le volume d'air à la pression 0,76, la température restant la même?

Le volume d'air étant 4 lit., 3 à la pression 0,74, il serait, d'après la loi de Mariotte, 74 fois plus grand à la pression $0^m,01$, ou 4 lit., 3×74; et, d'après la même loi, il sera 76 fois plus petit à la pression de $0^m,76$, c'est-à-dire $\frac{4,3 \times 74}{76} = 4$ lit., 186.

II. On a 20 litres de gaz sous la pression d'une atmosphère; à quelle pression, en atmosphères, doit être soumis ce volume pour se réduire à 8 litres?

Pour réduire le volume de 20 litres à un seul, il faudrait, d'après la loi de Mariotte, une pression 20 fois plus grande, ou 20 atmosphères; pour l'amener ensuite d'un seul litre à 8, il faut une pression 8 fois plus petite, c'est-à-dire $\frac{20}{8} = 2$ atmosphères $\frac{1}{2}$.

III. Un litre d'air pèse gr. 1,3, à 0° et sous la pression 76^c de mercure; quel serait son poids, à température égale, si la pression était 72^c?

Le poids d'un volume donné de gaz étant directement proportionnel à la pression, un litre d'air à la pression de 1^c pèserait 76 fois moins qu'à la pression 76, c'est-à-dire $\frac{1^{gr},3}{76}$, et à la pression 72, il pèse 72 fois plus, ou $\frac{1^{gr},3 \times 72}{76} = 1^{gr},23$.

152. Manomètres. — On donne le nom général de *manomètres* à des instruments destinés à mesurer la tension des gaz ou des vapeurs, lorsqu'elle est supérieure à la pression atmosphérique. On

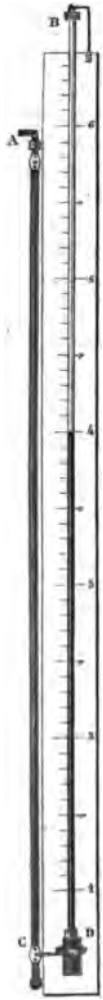


Fig. 89.
(h=4m,80).

distingue le manomètre à air libre, le manomètre à air comprimé et le manomètre métallique.

Dans ces différents genres de manomètres, l'unité de mesure qu'on a choisie est la pression atmosphérique, lorsque le baromètre est à $0^{m},76$. Or, on a vu (137) que cette pression, sur un centimètre carré, équivaut au poids de $1^{kil},033^{gr}$; par conséquent, si l'on dit d'un gaz qu'il a une tension de deux, de trois atmosphères, cela signifie qu'il exerce, sur chaque centimètre carré des parois qui le contiennent, une pression égale à deux fois ou à trois fois le poids de $1^{kil},033^{gr}$.

153. **Manomètre à air libre.** — Le *manomètre à air libre* se compose d'un tube BD (fig. 89), de cristal, long de 5 mètres environ, et d'une cuvette D, de fer forgé, contenant du mercure dans lequel plonge le tube. Celui-ci, qui est ouvert aux deux bouts, est solidement mastiqué à la cuvette et fixé sur une planche de sapin, le long de laquelle est un deuxième tube AC, de fer, haut de 4 mètres. C'est par ce tube que la pression du gaz ou de la vapeur se transmet jusqu'au mercure de la cuvette. Les manomètres fonctionnant le plus souvent avec de la vapeur, dont la température élevée ramollirait le mastic qui sert à fixer le tube de cristal à la cuvette, on remplit le tube AC d'eau, et c'est celle-ci qui reçoit directement la pression de la vapeur et la transmet au mercure.

Pour graduer le manomètre, on laisse l'orifice A communiquer avec l'atmosphère, et, au niveau où le mercure s'arrête alors dans le tube de cristal, on marque le chiffre 1, c'est-à-dire une atmosphère; puis, à partir de ce point, de 76 en 76 centimètres, on marque les chiffres 2, 3, 4, 5, 6, qui indiquent le même nombre d'atmosphères, puisqu'on sait qu'une colonne de mercure de 76 centimètres représente la pression atmosphérique. On partage enfin les intervalles de 1 à 2, de 2 à 3... en dix parties égales, qui donnent les dixièmes d'atmosphère.

Le tube A étant ensuite mis en communication, par exemple, avec une chaudière à vapeur, le mercure s'élève, dans le tube BD, à une hauteur qui mesure la tension de la vapeur.

Dans notre dessin, le manomètre marque 4 atmosphères, qui sont représentées par 3 fois la hauteur 76 centimètres, plus la pression atmosphérique qui s'exerce au sommet de la colonne.

Le manomètre à air libre n'est en usage que pour des pressions qui ne dépassent pas 5 à 6 atmosphères. Au delà, il faudrait donner au tube BD une longueur qui le rendrait aussi fragile qu'embarrassant. On a recours alors au manomètre suivant.

154. **Manomètre à air comprimé.** — Le *manomètre à air comprimé*, fondé sur la loi de Mariotte, se compose d'un tube de cristal fermé à son extrémité supérieure et rempli d'air sec. Ce tube plonge dans une cuvette de fer, en partie pleine de mercure, à laquelle il est mastiqué. Celle-ci, par une tubulure latérale A (fig. 90), est mise en communication avec un vase clos qui contient le gaz ou la vapeur dont il s'agit de mesurer la force élastique.

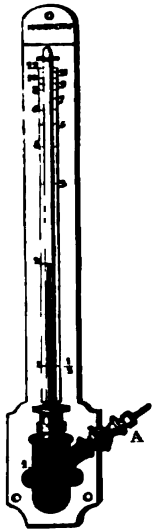


Fig. 90 (h=80).

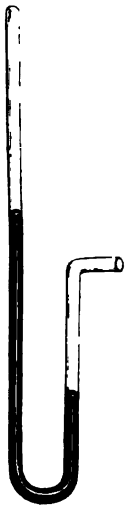


Fig. 91.

Quant à la graduation de ce manomètre, la quantité d'air renfermée dans le tube est telle, que lorsque l'orifice A communique avec l'atmosphère, le niveau du mercure est le même dans le tube et dans la cuvette. En conséquence, à ce niveau, on marque le chiffre 1 sur la planchette à laquelle est fixé le tube. Pour achever la graduation, il faut observer que la pression qui se transmet par la tubulure A augmentant, le mercure s'élève dans le tube jusqu'à ce que son poids, ajouté à la tension que prend l'air comprimé, fasse équilibre à la pression extérieure. Il en résulte que si l'on marquait deux atmosphères au milieu du tube, à partir de 1, on commettrait une erreur; car, lorsque le volume d'air qui est dans le tube est réduit de moitié, sa tension, d'après la loi de Mariotte, est de deux atmosphères; par conséquent, augmentée du poids de la colonne de mercure qui s'est élevée dans le tube, elle représente une pression plus grande que deux atmosphères. Ce n'est donc pas au milieu du tube qu'il faut marquer 2, mais un peu au-dessous,

à une hauteur telle que la force élastique de l'air comprimé, ajoutée au poids de la colonne de mercure qui est dans le tube, égale deux atmosphères. C'est par le calcul que se détermine la position exacte des chiffres 2, 3, 4..., sur l'échelle du manomètre.

Pour faire ce calcul, considérons d'abord le cas où le diamètre intérieur de la cuvette est assez grand pour qu'on puisse admettre que le niveau y reste sensiblement constant, lorsque le mercure s'élève dans le tube. Cela posé, le manomètre étant mis en communication avec un vase qui contient un gaz comprimé, soient F la tension en centimètres dans ce vase, h la hauteur du tube manométrique à partir du niveau du mercure dans la cuvette, et x la hauteur à laquelle s'élève le mercure par l'effet de la pression F.

La pression extérieure étant d'abord d'une atmosphère, ou 76 centimètres, le volume d'air dans le tube manométrique peut être représenté par h; puis la pression extérieure devenant F, le volume d'air se réduit à $h - x$; il est donc alors plus comprimé, et acquiert une tension f qu'on calcule, d'après la loi de Mariotte, en posant $\frac{f}{76} = \frac{h}{h - x}$, d'où $f = \frac{76h}{h - x}$. Or, F faisant équilibre à la colonne de mercure x et à l'élasticité f de l'air comprimé, on a $F = \frac{76h}{h + x} + x$ [1]; d'où l'on tire les deux valeurs

$$x' = \frac{(F + h) + \sqrt{(F + h)^2 - 4h\,(F - 76)}}{2},$$

$$x'' = \frac{(F + h) - \sqrt{(F + h)^2 - 4h\,(F - 76)}}{2}.$$

La seconde est la seule qui satisfasse à la question, car en y faisant $F = 76$, il vient $x = 0$, ce qui doit être; en y faisant successivement $F = 2.76, 3.76, 4.76$..... on trouve les hauteurs auxquelles il faut inscrire les chiffres 2, 3, 4,..... sur l'échelle.

Si actuellement on veut tenir compte de la dépression du mercure dans la cuvette, soient x' cette dépression, R le rayon intérieur de la cuvette, r celui du tube manométrique, et x l'ascension du mercure dans ce dernier. L'ascension et la dépression du mercure étant en raison inverse des sections du tube et de la cuvette, ou, ce qui est la même chose, en raison inverse des carrés des rayons de ces mêmes sections, on a $\frac{x'}{x} = \frac{r^2}{R^2}$, d'où $x' = \frac{r^2 x}{R^2}$.

Cela posé, la différence de niveau dans le tube et dans la cuvette étant actuellement $x + x'$, la tension F fait équilibre à une colonne de mercure $x + x'$, plus à la force élastique de l'air comprimé dans le tube, laquelle est encore $\frac{76h}{h - x}$. On a donc $F = x + x' + \frac{76h}{h - x}$. En remplaçant x' par sa valeur et réduisant

$$F = \frac{(R^2 + r^2)\,x}{R^2} + \frac{76h}{h - x} \quad [2].$$

Dans le cas où le manomètre consisterait simplement en un tube recourbé, fermé à son extrémité supérieure et contenant du mercure (fig. 91), on aurait $R = r$, et alors la formule [2] devient $F = 2x + \frac{76h}{h - x}$ [3].

* 155. **Manomètre de M. Bourdon.** — M. Bourdon, mécanicien à Paris, a inventé, il y a quelques années, un nouveau manomètre représenté dans la figure 92. Cet instrument, qui est entièrement métallique et sans mercure, est basé sur le principe suivant, fondé sur la déformation qu'éprouvent les tubes par la pression : lorsqu'un tube, à parois flexibles et légèrement aplaties sur elles-mêmes, est enroulé en spirale, dans le sens de son plus petit diamètre, *toute pression intérieure sur les parois a pour effet de dérouler le tube, et, au contraire, toute pression extérieure a pour effet de l'enrouler davantage.*

Fig. 92 (h = 26).

D'après ce principe, le manomètre de M. Bourdon se compose d'un tube recourbé, en laiton, long de 0m,7, dont les parois sont minces et flexibles. Sa section, qui est représentée en S sur la gauche de la figure, est une ellipse dont le grand axe est de 11 millimètres et le petit de 4. L'extrémité *a*, qui est ouverte, est fixée à une tubulure à robinet *m*, destinée à mettre l'appareil en communication avec une chaudière à vapeur. L'extrémité *b* est fermée et mobile ainsi que tout le reste du tube.

Cela posé, le robinet *m* étant ouvert, la pression qui se produit, en vertu de la tension de la vapeur, sur l'intérieur des parois du tube, le fait se dérouler. L'extrémité *b* est alors entraînée de gauche à droite, et avec elle une longue aiguille *e*, qui indique, sur un cadran, la tension de la vapeur en atmosphères. Ce cadran se gradue d'avance comparativement à un manomètre à air libre, en faisant marcher l'appareil avec de l'air comprimé.

Le manomètre de M. Bourdon offre le précieux avantage, sur les précédents, d'être très-portatif et nullement fragile. Aussi fonctionne-t-il sur les locomotives de plusieurs chemins de fer.

* 156. **Baromètre métallique de M. Bourdon.** — M. Bourdon

est l'inventeur d'un baromètre métallique fondé sur le même principe que son manomètre. Cet appareil, représenté dans la figure 93, se compose d'un tube semblable à celui du manomètre ci-dessus, mais moins long, hermétiquement fermé et fixé seulement en son milieu ; en sorte que le vide y ayant été fait d'avance, toutes les fois que la pression atmosphérique diminue, ce tube se déroule en vertu du principe donné plus haut (155). Le mouvement se communique ensuite à une aiguille qui indique la pression sur un cadran. Quant à la transmission de mouvement, elle a lieu au moyen de deux petits fils métalliques *b* et *a*, qui lient les extrémités du tube à un levier fixé à l'axe de l'aiguille. Si, au contraire, la pression augmente, le tube se ferme sur lui-même, et c'est un petit ressort en spirale *c* qui ramène alors l'aiguille de gauche à droite au-dessus du cadran. Ce baromètre est d'un très-petit volume, très-sensible, et remarquable par son extrême simplicité.

Fig. 93 (h = 10).

157. **Lois des mélanges des gaz.** — On a vu que dans les mélanges des liquides il ne peut y avoir équilibre que lorsque ceux-ci sont superposés par ordre de densités croissantes de haut en bas (89), et que la surface de séparation des différents liquides est horizontale. Les gaz, en vertu de leur force expansive, présentent, lorsqu'on les mélange, d'autres conditions d'équilibre, qui sont les deux suivantes :

1° *Le mélange, qui s'opère toujours rapidement, est homogène et persistant, en sorte que toutes les parties du volume total contiennent la même proportion de chacun des gaz mélangés.*

2° *La température étant constante, si le mélange a lieu dans un vase à parois inextensibles, la force élastique du mélange est toujours égale à la somme des forces élastiques des gaz mélangés, rapportés chacun au volume total, d'après la loi de Mariotte.*

Cette seconde loi peut encore s'énoncer en disant que, *dans un*

mélange de plusieurs gaz, la pression exercée par chacun d'eux est la même que s'il était seul.

La première loi est une conséquence de l'extrême porosité des gaz et de leur force expansive. Elle a été démontrée, pour la première fois, par le chimiste français Berthollet, au moyen de l'appareil représenté dans la figure 94, lequel se compose de deux ballons de verre munis chacun d'un col à robinet, et vissés l'un sur l'autre. Le ballon supérieur était rempli d'hydrogène, dont la densité est 0,0692, et l'autre de gaz acide carbonique, dont la densité est 1,529, c'est-à-dire 22 fois plus grande. L'appareil fut placé dans les caves de l'Observatoire, pour le préserver de toute agitation et des variations de température. Les robinets ayant été ouverts, l'acide carbonique, malgré son excès de poids, passa en partie dans le ballon supérieur, et, au bout de peu de temps, on constata que les deux ballons contenaient des proportions égales d'hydrogène et d'acide carbonique. Soumis à la même expérience, tous les gaz qui n'ont pas entre eux d'action chimique donnent le même résultat, et on remarque que le mélange s'opère d'autant plus rapidement que la différence des densités est plus grande.

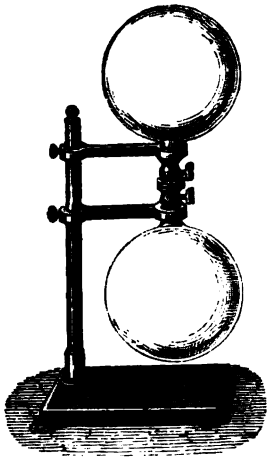


Fig. 94.

La deuxième loi est une conséquence de la loi de Mariotte. Il en découle de plus que si les parois du vase où l'on fait le mélange sont extensibles, et si les gaz qu'on mélange sont soumis à la pression atmosphérique, la force élastique du mélange est aussi égale à cette pression ; mais alors le volume du mélange est précisément égal à la somme des volumes des gaz mélangés. Enfin, les mélanges gazeux sont soumis à la loi de Mariotte, de même que les gaz simples ; c'est ce qui a été déjà constaté pour l'air (150), qui est un mélange d'azote et d'oxygène.

158. **Lois des mélanges des gaz et des liquides.** — L'eau et plusieurs liquides sont doués de la propriété de se laisser pénétrer par les gaz. Mais, dans les mêmes conditions de température et de pression, un même liquide n'absorbe pas des quantités égales de gaz différents. Par exemple, à la température et à la pression ordi-

naires, l'eau dissout 25 millièmes de son volume d'azote, 46 millièmes du même volume d'oxygène, un volume égal au sien d'acide carbonique, et 430 fois son volume de gaz ammoniac. Le mercure paraît se refuser entièrement à la pénétration des gaz.

L'expérience démontre que les mélanges des gaz et des liquides sont soumis aux trois lois suivantes :

1° *Pour un même gaz, un même liquide et une même température, le poids de gaz absorbé est proportionnel à la pression*, ce qui revient à dire qu'à toutes les pressions le volume dissous est le même, ou encore que la densité du gaz absorbé est dans un rapport constant avec celle du gaz extérieur non absorbé.

2° *La quantité de gaz absorbée est d'autant plus grande que la température est plus basse*, c'est-à-dire que la force élastique du gaz est moindre.

3° *La quantité de gaz qu'un liquide peut dissoudre est indépendante de la nature et de la quantité des autres gaz qu'il tient déjà en dissolution.*

En effet, si au lieu d'un seul fluide élastique, l'atmosphère supérieure au liquide en contient plusieurs, on trouve que chacun de ces gaz, quel qu'en soit le nombre, se dissout dans la même proportion que s'il était seul, en tenant compte toutefois de la pression qui lui est propre. Par exemple, l'oxygène ne formant sensiblement que $\frac{1}{5}$ de l'air, l'eau, dans les conditions ordinaires, absorbe précisément la même quantité d'oxygène que si l'atmosphère était tout entière formée de ce gaz, sous une pression égale à $\frac{1}{5}$ de celle de l'atmosphère.

D'après la première loi, lorsque la pression diminue, la quantité de gaz dissoute doit décroître. C'est ce qu'on vérifie en plaçant une dissolution gazeuse sous la cloche de la machine pneumatique, et en faisant le vide : on voit le gaz obéir à sa force expansive et se dégager en bulles. On obtient encore le même effet par l'élévation de température, car la force élastique du gaz dissous augmente.

159. **Équilibre des fluides dont les diverses parties n'ont pas la même densité.** — L'équilibre ne peut exister dans une masse fluide, soit liquide, soit gazeuse, qu'autant que la pression étant la même sur tous les points de chaque tranche horizontale (81), il en est de même de la densité ; autrement, les parties les moins denses s'élèvent dans la masse fluide, à la manière des corps flottants (98), et les plus denses s'abaissent. Par conséquent, pour qu'une masse fluide demeure en équilibre, il faut : 1° *que la densité soit la même pour tous les points d'une couche horizontale;* 2° pour

que l'équilibre soit stable, *les couches fluides doivent être disposées par ordre de densités croissantes de haut en bas* (89).

Or, les gaz et les liquides étant très-dilatables par l'action de la chaleur, leur densité décroît quand la température augmente; par conséquent, la deuxième condition ci-dessus ne peut être satisfaite, pour les liquides du moins, qu'autant que les couches inférieures sont plus froides que les couches supérieures. Mais pour les gaz, qui sont très-compressibles, il n'est pas nécessaire que les couches supérieures soient plus chaudes que les couches inférieures; car ces dernières, étant plus comprimées, tendent à être plus denses : il suffit donc que la densité augmente plus par l'effet de la pression dans les couches inférieures, qu'elle ne décroît par l'élévation de la température : c'est ce qui a lieu, en général, dans l'atmosphère.

Les courants qui naissent dans une masse fluide par l'effet des différences de densité résultant des différences de température d'une couche à l'autre, ont reçu leur application dans le tirage des cheminées, et dans les appareils de chauffage par circulation d'eau chaude. Nous donnerons ces applications (liv. VI, chap. XI) après avoir fait connaître la dilatation des liquides et des gaz.

CHAPITRE III

PRESSIONS SUPPORTÉES PAR LES CORPS PLONGÉS DANS L'AIR, AÉROSTATS.

160. Principe d'Archimède appliqué aux gaz. — On sait que les pressions exercées par les gaz, en vertu de leur force élastique et de leur poids, se transmettent également en tous les sens (130), cela a été démontré pour l'air au moyen des hémisphères de Magdebourg (134) : il en résulte qu'on peut appliquer mot à mot aux corps plongés dans l'atmosphère ce qu'on a dit (95) des corps plongés dans les liquides, et conclure qu'ils perdent de leur poids un poids égal à celui de l'air qu'ils déplacent.

Cette perte de poids, dans l'air, se démontre au moyen du *baroscope*. On nomme ainsi un appareil qui consiste en un fléau de balance portant, à l'une de ses extrémités, une petite masse de plomb, et à l'autre une sphère de cuivre creuse, dont le volume est environ d'un demi-décimètre cube (fig. 95). Dans l'air, les deux corps se font équilibre; mais si l'on place l'appareil sous le

récipient de la machine pneumatique et si l'on fait le vide, on voit le fléau incliner vers la grosse sphère, ainsi que le montre la figure ci-dessous, ce qui indique qu'en réalité elle pèse plus que la petite masse de plomb, car actuellement elles ne supportent l'une et l'autre aucune pression, et n'obéissent qu'à la pesanteur. Donc, dans l'air, la sphère perdait une certaine partie de son poids. Si l'on veut vérifier, à l'aide du même appareil, que cette perte est bien égale au poids de l'air déplacé, on mesure le volume de la sphère, que nous supposerons égal à un demi-litre. Le poids d'un pareil volume d'air étant 0gr,65 (129), on attache ce poids à la petite masse de plomb; l'équilibre qui avait lieu auparavant, dans l'air, est alors rompu, mais, dans le vide, il se rétablit.

Fig. 95 (h = 20).

Le principe d'Archimède étant vrai pour les corps plongés dans l'air, on peut leur appliquer tout ce qui a été dit des corps plongés dans les liquides (98), c'est-à-dire que lorsqu'un corps est plus pesant que l'air, il tombe, en vertu de l'excès de son poids sur la poussée du fluide. S'il est de même densité que l'air, son poids et la poussée de bas en haut se font équilibre, et le corps flotte dans l'atmosphère. Enfin, si le corps est moins dense que l'air, c'est la poussée qui l'emporte, et le corps s'élève dans l'atmosphère jusqu'à ce qu'il rencontre des couches d'air de même densité que lui. La force d'ascension est alors égale à l'excès de la poussée sur le poids du corps. Telle est la cause qui fait que la fumée, les vapeurs, les nuages, les aérostats, s'élèvent dans l'atmosphère.

AÉROSTATS.

161. **Découverte des aérostats.** — Les *aérostats* ou *ballons* sont des globes en étoffe légère et imperméable, qui, remplis d'air chaud

ou de gaz hydrogène, s'élèvent dans l'atmosphère en vertu de leur légèreté relative.

L'invention des aérostats est due aux frères Étienne et Joseph Montgolfier, fabricants de papier dans la petite ville d'Annonay, où le premier essai eut lieu le 5 juin 1783. Ce premier ballon était un globe de toile doublé de papier, ayant 36 mètres de circonférence et pesant 250 kilogrammes. Ouvert à la partie inférieure, il fut gonflé d'air chaud, en brûlant au-dessous du papier, de la laine, de la paille mouillée.

« A cette nouvelle, écrivait l'académicien Lalande, nous dîmes tous : cela doit être; comment n'y a-t-on pas pensé ? » On y avait bien pensé; mais il y a loin de la conception d'une idée à sa réalisation. Black, professeur de physique à Édimbourg, avait annoncé dans ses cours, en 1767, qu'une vessie remplie d'hydrogène s'élèverait naturellement dans l'atmosphère; mais il ne fit jamais l'expérience, la regardant comme purement amusante. Enfin, Cavallo, en 1782, avait communiqué à la Société royale de Londres des expériences qu'il avait faites, et qui consistaient à remplir d'hydrogène des bulles de savon qui s'élevaient d'elles-mêmes dans l'atmosphère, le gaz qui les remplissait étant plus leger que l'air.

Quoi qu'il en soit, les frères Montgolfier ne connaissaient pas l'expérience de Cavallo, ni celle de Black, lorsqu'ils firent leur découverte. Comme ils employèrent exclusivement l'air chaud pour remplir leurs ballons, on a donné le nom de *Montgolfières* aux ballons à air chaud pour les distinguer des aérostats à hydrogène, les seuls usités aujourd'hui.

C'est Charles, professeur de physique à Paris, mort en 1823, qui, le premier, substitua le gaz hydrogène à l'air chaud. Le 27 août 1783, un ballon ainsi gonflé fut lancé au Champ-de-Mars. « Jamais, écrit Mercier, leçon de physique ne fut donnée devant un auditoire plus nombreux et plus attentif. »

Le 21 novembre de la même année, Pilâtre de Rozier entreprit, en compagnie du chevalier d'Arlandes, le premier voyage aérien dans un ballon libre à air chaud. L'ascension eut lieu dans le jardin de la Muette, près du bois de Boulogne. Les aéronautes entretenaient au-dessous du ballon un feu de paille mouillée pour maintenir la dilatation de l'air intérieur : le feu pouvait donc se communiquer à chaque instant à l'enveloppe.

Dix jours après, dans le jardin des Tuileries, Charles et Robert répétaient la même expérience avec un ballon à gaz hydrogène.

Le 7 janvier 1785, Blanchard, en compagnie du Dr Jeffries, fit le

premier, la traversée de Douvres à Calais. Les deux aéronautes n'atteignirent les côtes de France qu'à grand'peine et après avoir jeté à la mer jusqu'à leurs vêtements, pour rendre le ballon plus léger.

Depuis, un nombre considérable d'ascensions ont été exécutées. Celle que fit Gay-Lussac, en 1804, fut la plus remarquable par les faits dont elle a enrichi la science, et par la hauteur qu'atteignit le célèbre physicien, hauteur qui fut de 7016 metres au-dessus du niveau des mers. Depuis, M. Green s'est élevé plus haut encore. A cette hauteur, le baromètre était descendu à 32 centimètres, et le thermomètre centigrade, qui marquait 31 degrés à la surface du sol, était alors à 9°,5 au-dessous de zéro. Une ascension récente a donné, pour la même hauteur, une température encore beaucoup plus basse.

Dans ces hautes régions, la sécheresse était telle, le jour de l'ascension de Gay-Lussac, en juillet, que les substances hygrométriques, telles que le papier, le parchemin, se desséchaient et se tordaient, comme si on les eût présentées au feu. La respiration et la circulation du sang s'accélèrent à cause de la grande raréfaction de l'air. Gay-Lussac a constaté que son pouls faisait alors 120 pulsations au lieu de 66 qui était son état normal. A cette grande hauteur, le ciel prend une teinte bleue très-foncée, tirant sur le noir, et un silence absolu et solennel entoure l'aéronaute.

Parti de la cour du Conservatoire des arts et métiers, Gay-Lussac descendit auprès de Rouen, au bout de six heures, ayant fait environ 30 lieues.

162. **Construction, remplissage et ascension des aérostats.** — L'enveloppe des aérostats est formée de longs fuseaux de taffetas cousus ensemble et enduits d'un vernis au caoutchouc, qui rend le tissu imperméable. Au sommet du ballon est une soupape que maintient fermée un ressort et que l'aéronaute peut ouvrir, à volonté, à l'aide d'une corde. Une nacelle légère, en osier, dans laquelle peuvent se placer plusieurs personnes, pend au-dessous du ballon, soutenue par un filet en corde qui enveloppe celui-ci en entier (fig. 96 et 97).

Un ballon de dimension ordinaire, pouvant enlever facilement trois personnes, a environ 15 mètres de hauteur, 11 mètres de diamètre, et son volume, quand il est gonflé complétement, est de près de 700 mètres cubes. L'enveloppe pèse 100 kilogrammes, et les accessoires, tels que filet, nacelle, 50 kilogrammes.

On gonfle les ballons soit avec l'hydrogène pur, soit avec l'hydrogène carboné qui sert à l'éclairage. Bien que ce dernier gaz soit

plus dense que le premier, on l'emploie généralement aujourd'hui, parce qu'on l'obtient plus facilement et à meilleur compte que l'hydrogène pur. Il suffit, en effet, de le faire arriver de l'usine à gaz la plus voisine jusqu'à l'aérostat, au moyen d'un conduit en toile gommée.

La figure 96 représente un ballon gonflé d'hydrogène pur. Sur la

Fig. 96 (h = 15).

droite du dessin est une suite de tonneaux dans lesquels sont des copeaux de fer, de l'eau et de l'acide sulfurique, substances nécessaires pour la préparation de l'hydrogène. De chaque tonneau le gaz se rend sous un tonneau central, défoncé à la partie inférieure et plongeant dans une cuve remplie d'eau. Le gaz, après s'être lavé dans cette eau, se rend dans l'aérostat par un long tube de toile, fixé, par un bout, au tonneau central, et, par l'autre, à l'aérostat.

Pour faciliter l'introduction du gaz dans le ballon, on dresse deux mâts; à leur sommet sont des poulies sur lesquelles s'enroule une

corde qui passe dans un anneau fixé à la couronne de la soupape. Par ce moyen, l'aérostat étant d'abord soulevé d'un mètre environ au-dessus du sol, on fait arriver le gaz; puis, à mesure que le ballon se remplit, on le soulève un peu plus haut, en ayant soin de l'aider à se déployer, et cela jusqu'à ce qu'il n'ait plus besoin de tutelle. Mais il faut alors s'opposer à sa force d'ascension. Pour cela, des hommes le retiennent au moyen de cordes fixées au filet. Il ne reste plus qu'à enlever le tube qui a servi à conduire le gaz, et à attacher la nacelle au filet. Ces divers préparatifs exigent au moins deux heures. L'aéronaute se place enfin dans la nacelle; à un signal donné, on lâche les cordes, et le ballon s'élève avec une vitesse d'autant plus grande qu'il est plus léger par rapport à l'air déplacé (fig. 97).

Il importe de ne pas gonfler un ballon complétement, car la pression atmosphérique diminuant à mesure qu'il s'élève, le gaz intérieur se dilate en vertu de sa force expansive, et tend à le faire crever.

Il suffit que la force d'ascension, c'est-à-dire l'excès du poids de l'air déplacé sur le poids total de l'appareil, soit de 4 à 5 kilogrammes. Il est à remarquer que cette force reste constante tout le temps que le ballon n'est pas complétement gonflé par la dilatation du gaz intérieur. En effet, si la pression atmosphérique est devenue, par exemple, deux fois plus petite, le gaz de l'aérostat, d'après la loi de Mariotte, a doublé de volume. Il en résulte que le volume d'air déplacé est lui-même devenu deux fois plus grand; d'ailleurs sa densité est deux fois moindre; donc son poids, et, par suite, la poussée de bas en haut, n'ont pas changé. Mais une fois que le ballon est complétement gonflé, s'il continue à s'élever, la force d'ascension décroît; car le volume d'air déplacé restant le même, sa densité diminue. Il vient donc un moment où la poussée est égale au poids du ballon. Par conséquent, le ballon ne fait que suivre une direction horizontale, emporté par les courants d'air qui règnent dans l'atmosphère.

Ce n'est que d'après les indications du baromètre que l'aéronaute sait s'il monte ou s'il descend. Dans le premier cas, la colonne de mercure s'abaisse; elle s'élève, dans le second. C'est à l'aide du même instrument qu'il évalue la hauteur à laquelle il se trouve. Une longue banderole fixée à la nacelle (fig. 97) indique aussi, par la position qu'elle prend au-dessous ou au-dessus de celle-ci, si l'on monte ou si l'on descend.

Lorsque l'aéronaute veut opérer sa descente, il tire la corde qui

ouvre la soupape placée à la partie supérieure du ballon, l'hydrogène se mélange alors avec l'air extérieur, et le ballon baisse. Au contraire, pour ralentir la descente lorsqu'elle est trop rapide, ou pour remonter si elle s'effectue dans un endroit périlleux, l'aéronaute vide des sacs de toile pleins de sable dont il a eu soin de se munir en quantité suffisante. Ainsi allégé, le ballon s'élève de nouveau pour descendre ensuite dans un lieu plus propice. On facilite encore la descente en suspendant, par une longue corde, une ancre à la nacelle. Une fois que cette ancre est fixée à un obstacle, on s'abaisse lentement en tirant sur la corde.

Fig. 97.

Les aérostats n'ont pas eu jusqu'ici d'applications importantes. A la bataille de Fleurus, en 1794, on fit usage d'un ballon captif, c'est-à-dire retenu par une corde, dans lequel était un observateur qui faisait connaître, par des signaux, les mouvements de l'ennemi. Plusieurs ascensions ont aussi été entreprises dans le but de faire des observations météorologiques dans les hautes régions de l'atmosphère. Mais les aérostats ne pourront être d'une véritable utilité que le jour où l'on pourra les diriger. Les tentatives faites jusqu'ici, dans ce but, ont complétement échoué. On n'a, aujourd'hui, d'autre ressource que de s'élever dans l'atmosphère jusqu'à ce qu'on rencontre un courant d'air qui porte plus ou moins dans la direction qu'on veut suivre.

163. **Parachute.** — Le *Parachute* a pour objet de permettre à

l'aéronaute d'abandonner son ballon, en lui donnant le moyen de ralentir la vitesse de la chute. Cet appareil est formé d'une vaste toile circulaire (fig. 98) d'environ 5 mètres de diamètre, qui, par l'effet de la résistance de l'air, s'étend en forme d'un vaste parapluie, et ne tombe que lentement. Sur le contour sont fixées des cordes qui soutiennent une nacelle où se place l'aéronaute. Au

Fig. 98.

centre du parachute est une ouverture par laquelle s'échappe l'air comprimé par l'effet de la descente ; autrement, il se produit des oscillations qui se communiquent à la nacelle et peuvent être dangereuses.

Dans la figure 97, on voit, sur le côté du ballon, un parachute plié et attaché au filet, au moyen d'une corde passant sur une poulie pour venir se fixer à la nacelle. Il suffit de lâcher cette corde pour que le parachute abandonne l'aérostat.

C'est J. Garnerin qui descendit, le premier, en parachute, mais c'est Blanchard qui paraît en être l'inventeur.

164. Calcul du poids que peut enlever un ballon. — Pour calculer le poids que peut enlever un ballon dont les dimensions sont données, on le suppose parfaitement sphérique et on fait usage de la formule $V = \frac{4\pi R^3}{3}$, qui représente, en géométrie, le volume d'une sphère dont R est le rayon, π étant le rapport de la circonférence au diamètre. Soit donc un ballon rempli d'hydrogène, et d'un diamètre de 11 mètres. S'il était complétement gonflé, son volume serait de 696 mètres cubes, d'après la formule ci-dessus. Mais comme, en général, au moment du départ, le ballon n'est qu'à moitié gonflé, on peut prendre, pour volume, 348 mètres cubes. Tel est donc le volume d'air déplacé au moment où l'ascension commence. Or, 1 litre d'air pesant 1gr,3 (129), 1 mètre cube pèse 1k,300gr, d'où 348 mètres cubes d'air pèsent 452 kilogrammes. C'est là la poussée qui tend à soulever le ballon (160). Pour calculer la force d'ascension réelle, il faut en retrancher le poids de l'hydrogène renfermé dans le ballon et celui de l'enveloppe et des accessoires. Or, le poids de l'hydrogène étant à peu près 14 fois moindre que celui de l'air, le poids du gaz contenu dans le ballon est sensiblement $\frac{1}{14}$ de 452, ou 32 kilogrammes. Ajoutant à ce poids celui de l'enveloppe et des accessoires évalué à 150 kilogrammes, le poids à retrancher de 452 est 182. Il reste donc 270 kilogrammes pour la force d'ascension. Comme il suffit que cette force soit de 5 kilogrammes, on voit que le ballon peut enlever 265 kilogrammes.

CHAPITRE IV.

APPAREILS FONDÉS SUR LES PROPRIÉTÉS DE L'AIR.

165. Machine pneumatique. — La *Machine pneumatique* est un appareil qui sert à faire le vide dans un espace donné, ou, plus rigoureusement, à raréfier l'air, car elle ne peut donner le vide absolu.

Cette machine a été inventée par Otto de Guéricke, bourgmestre de Magdebourg, en 1650, peu d'années après l'invention du baromètre. Ce physicien ne donna à sa machine qu'un seul corps de pompe. C'est Hawksebee, physicien anglais, qui, le premier, adopta deux corps de pompe, et rendit ainsi la manœuvre de la machine moins pénible et plus prompte, les pressions exercées par l'atmosphère sur les deux pistons tendant à s'équilibrer.

Telle qu'elle se construit aujourd'hui, la machine pneumatique se compose de deux cylindres de cristal dans chacun desquels est un piston P (fig. 99) formé de plusieurs rondelles de cuir superposées, et huilé de manière à fermer hermétiquement contre les parois des cylindres, afin de ne pas laisser rentrer l'air. A chaque piston est fixée une tige à crémaillère dans les dents de laquelle engrène un pignon H (fig. 101) qu'on fait marcher alternativement de

gauche à droite et de droite à gauche, au moyen d'une manivelle MN; en sorte que lorsqu'un des pistons s'élève, l'autre s'abaisse.

Les deux corps de pompe sont mastiqués, à leur base, sur un support de cuivre qui se termine, à l'extrémité opposée, par un plateau D (fig. 99), recouvert d'une glace de verre, épaisse et bien dressée. C'est sur ce plateau, qu'on nomme la *platine*, que se place le *récipient* E dans lequel il s'agit de faire le vide. Au centre

Fig. 99 (h = 70.).

du plateau est une ouverture C qui fait communiquer l'intérieur du récipient avec les corps de pompe, au moyen d'un canal représenté en plan dans la figure 100, et se bifurquant suivant K*cbs* et K*cdo*.

La figure 101 représente une coupe verticale et antérieure des corps de pompe. Elle montre comment le pignon H, mû par la manivelle MN, transmet le mouvement aux deux crémaillères et, par suite, aux pistons P et Q. Ceux-ci ne sont pas pleins : dans leur inté-

rieur est une cavité cylindrique, fermée, à sa base, par une petite soupape que maintient un faible ressort. Les cavités où sont placées ces soupapes sont en communication avec le compartiment supérieur des corps de pompe par un trou pratiqué dans la partie supérieure de chaque piston, et toujours ouvert afin de donner issue à l'air. Outre les soupapes placées dans l'intérieur des pistons, deux autres soupapes *o* et *s* se trouvent à la base des corps de pompe. Elles sont coniques et fixées chacune à une tige de fer qui glisse à frottement doux dans la masse des pistons. Ces soupapes ouvrent et ferment alternativement la communication entre les corps de pompe et le

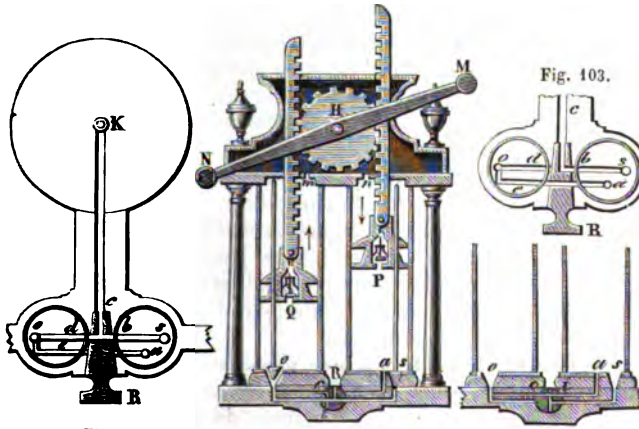


Fig. 100. Fig. 101. Fig. 102.

récipient. Si le piston P, par exemple, descend, il entraîne avec lui la tige de fer et fait fermer la soupape *s*. S'il s'élève, la tige et la soupape sont soulevées, mais d'une très-petite hauteur, parce que cette tige a une longueur telle qu'elle vient buter de suite contre le plateau supérieur du corps de pompe. Alors, elle ne fait plus que glisser dans le piston, qui s'élève seul.

Pour comprendre le jeu de la machine, il suffit de considérer ce qui se passe dans l'un des corps de pompe, puisque tout est identique dans l'autre. Lorsque le piston Q, par exemple, d'abord au bas de sa course, se soulève par l'action de la manivelle, il entraîne avec lui la tige et la soupape *o*. Quant à la soupape qui est dans l'intérieur du piston, elle reste fermée pendant que celui-ci s'élève, en

vertu de son propre poids et de celui de l'atmosphère; car les plateaux supérieurs des corps de pompe sont percés de petites ouvertures *m* et *n* par lesquelles se transmet la pression extérieure. D'après cette disposition des soupapes, le vide tend à se produire au-dessous du piston pendant qu'il monte; mais l'air du récipient, obéissant à son élasticité, passe en partie dans le corps de pompe par l'orifice *o*. Si, par exemple, le volume du corps de pompe est $\frac{1}{20}$ de celui du récipient, $\frac{1}{21}$ de la masse de l'air de ce dernier passe dans le corps de pompe.

Lorsque le piston descend, la tige de la soupape *o* étant entraînée de haut en bas, cette soupape se ferme, et l'air du corps de pompe ne peut pas retourner dans le récipient. Le piston continuant à descendre, l'air qui est au-dessous se comprime de plus en plus, jusqu'à ce que sa force élastique, devenue plus grande que la pression atmosphérique, soulève la soupape qui est dans l'intérieur du piston. L'air comprimé passe alors au-dessus de ce piston, et par l'ouverture *m* réservée à la partie supérieure, il s'échappe dans l'atmosphère. Lorsque le piston est arrivé en bas de sa course, tout l'air qui avait été extrait du récipient se trouve sensiblement expulsé. A un second coup de piston, la même série de phénomènes se renouvelle, et ainsi de suite dans les deux corps de pompe, jusqu'à ce qu'on atteigne une limite où l'air qui arrive du récipient est tellement raréfié qu'il ne peut plus soulever la soupape intérieure du piston, même quand celui-ci est au bas de sa course.

166. **Éprouvette de la machine pneumatique.** — Lorsqu'on a pompé un certain temps, on mesure la force élastique de l'air qui reste dans le récipient, par la différence de niveau que prend le mercure dans les deux branches d'un tube de verre recourbé en siphon, l'une d'elles étant fermée, et l'autre ouverte, comme dans le baromètre. Ce petit instrument, qu'on nomme *éprouvette* ou *baromètre tronqué*, parce que c'est un véritable baromètre à siphon qui a moins de 76 centimètres de hauteur, est fixé sur une échelle verticale et placé sous une cloche de cristal (fig. 99), laquelle communique avec le récipient E par un robinet A, posé sur le conduit qui va de l'orifice C aux corps de pompe. Enfin, la branche fermée et la partie courbe du tube ont d'avance été remplies de mercure.

Cela posé, avant qu'on commence à aspirer l'air qui est sous le récipient, sa force élastique fait équilibre au poids de la colonne de mercure qui est dans la branche fermée, et celle-ci reste pleine; mais à mesure que l'air est raréfié par le jeu des pistons, la force élastique

diminue, et bientôt elle ne peut plus faire équilibre au poids de la colonne de mercure. Celle-ci baisse alors, et le mercure tend à se mettre de niveau dans les deux branches. Si l'on arrivait à faire le vide absolu, le niveau s'établirait exactement, car il n'y aurait de pression ni d'un côté ni de l'autre. Mais avec les meilleures machines, le niveau reste toujours plus élevé d'un millimètre, au moins, dans la branche fermée; ce qui indique que le vide n'est pas parfait, puisqu'il reste encore une quantité d'air dont la tension fait équilibre à une colonne de mercure d'un millimètre.

Pratiquement, la machine pneumatique ne peut donner le vide absolu, parce que, ainsi qu'on l'a déjà vu ci-dessus, il vient un moment où l'air qui y reste est tellement raréfié que, même lorsque les pistons sont au bas de leur course, sa force élastique ne peut vaincre la pression atmosphérique qui pèse sur les soupapes placées dans l'intérieur des pistons, et dès lors elles ne s'ouvrent plus. Théoriquement, le vide absolu est encore impossible, car le volume de chaque corps de pompe étant, par exemple, $\frac{1}{20}$ de celui du récipient, on extrait, à chaque coup de piston, seulement $\frac{1}{21}$ de la masse de l'air qui reste dans le récipient; par conséquent, on n'enlève jamais tout l'air qu'il contient. On démontre, en effet, par le calcul, que le nombre des coups de piston croissant en progression arithmétique, la force élastique de l'air sous le récipient décroît en progression géométrique; d'où l'on conclut qu'il faudrait un nombre de coups de piston infini pour faire le vide parfait.

167. **Robinet à double épuisement.** — M. Babinet a appliqué à la machine pneumatique un robinet qui permet de pousser la raréfaction de l'air à un très-haut degré. Ce robinet est placé à la bifurcation du canal qui conduit l'air du récipient aux deux corps de pompe; il est percé, dans sa masse, de plusieurs conduits qu'on utilise successivement en le tournant dans deux positions différentes. La figure 100 représente une coupe horizontale du robinet R, dans une position telle que, par son ouverture centrale et par deux ouvertures latérales, il établit la communication entre l'orifice K de la platine et les soupapes *o* et *s*. La machine fonctionne alors comme il a été dit ci-dessus (165). Dans la figure 103, le robinet a tourné sur lui-même d'un quart de tour, le canal transversal *db*, qui était horizontal dans la figure 100, est maintenant vertical, et ses orifices se trouvent fermés par les parois qui enveloppent le robinet. Mais un second conduit, qui ne fonctionnait pas d'abord, et qui a pris la place du premier, met actuellement le corps de pompe de droite

seul en communication avec le récipient par le canal *cbs* (fig. 103), et de plus, il fait communiquer le corps de pompe de droite avec celui de gauche par un conduit *aeo* (fig. 103), ou *atco* (fig. 102). Ce conduit part d'une ouverture centrale *a*, placée à la base du corps de pompe de droite, et se rend à la soupape *o* de l'autre corps de pompe, à travers le robinet, comme le représentent les figures 102 et 103; mais le même conduit se trouve interrompu par le robinet, lorsque celui-ci est dans sa première position, ainsi que le font voir les figures 100 et 101.

Cela posé, le piston de droite, se soulevant, aspire l'air du récipient; mais lorsqu'il descend, l'air qui vient d'être aspiré est refoulé dans le corps de pompe de gauche à travers l'orifice *a*, le canal *ct* et la soupape *o* (fig. 102), qui est alors ouverte. Lorsque ensuite le même piston remonte, celui de gauche s'abaisse, mais l'air qui est au-dessous ne retourne pas dans le corps de pompe de droite, parce que la soupape *o* est maintenant fermée. Le piston de droite continuant ainsi à aspirer de l'air du récipient et à le refouler dans le corps de pompe de gauche, l'air s'accumule dans celui-ci, et finit par y prendre la tension suffisante pour soulever la soupape du piston Q, ce qui était impossible avant que le robinet ne fût tourné, car ce n'est que lorsque les soupapes, dans les pistons, refusent de s'ouvrir, qu'on le tourne d'un quart de tour.

168. **Usages de la machine pneumatique.** — On a déjà fait connaître un grand nombre d'expériences faites à l'aide de la machine pneumatique. Telles sont celles de la pluie de mercure (15), de la chute des corps dans le vide (52), de la vessie dans le vide (127), du crève-vessie (133), des hémisphères de Magdebourg (134) et du baroscope (160).

La machine pneumatique sert encore à démontrer que l'air, par l'oxygène qu'il contient, est nécessaire à l'entretien de la combustion et de la vie. En effet, si l'on place, sous le récipient, un corps enflammé, une bougie, par exemple, on voit la flamme pâlir à mesure qu'on fait le vide, puis s'éteindre. De même, un animal tombe asphyxié et meurt, si, après l'avoir placé sous le récipient, on fait le vide. Les mammifères et les oiseaux périssent promptement dans le vide. Les poissons et les reptiles supportent beaucoup plus longtemps la privation de l'air. Quant aux insectes, ils peuvent rester dans le vide plusieurs jours sans périr.

Dans le vide, les substances fermentescibles se conservent sans altération pendant un temps très-long, n'étant pas en contact avec l'oxygène qui est nécessaire à la fermentation. Des aliments con-

servés dans des boîtes hermétiquement fermées, d'où l'on avait chassé l'air, ont été trouvés aussi frais au bout de plusieurs années que le premier jour.

La *fontaine dans le vide*, représentée dans la figure 104, est encore une expérience qui se fait avec la machine pneumatique, et qui sert à démontrer la force expansive de l'air. C'est un flacon contenant de l'eau et de l'air. Le goulot est fermé par un bouchon à travers lequel passe un tube qui plonge dans le liquide. Ce flacon étant posé sous le récipient, aussitôt qu'on raréfie l'air de celui-ci, on voit l'eau jaillir au sommet du tube, ce

Fig. 104.

Fig. 105.

qui est dû à la force élastique de l'air renfermé dans le flacon.

Enfin, la figure 105 représente une expérience qui fait voir l'effet de la pression atmosphérique sur le corps humain. Un manchon de verre, ouvert à ses deux extrémités, étant posé sur la platine de la machine, on place la paume de la main sur ses bords, et une autre personne fait le vide. Alors, la pression atmosphérique ne se faisant plus équilibre sur les deux faces de la main, celle-ci est fortement

pressée sur les bords du manchon, et ce n'est qu'avec effort qu'on peut l'en retirer. De plus, l'élasticité des fluides que contiennent les organes n'étant plus contre-balancée par le poids de l'atmo-

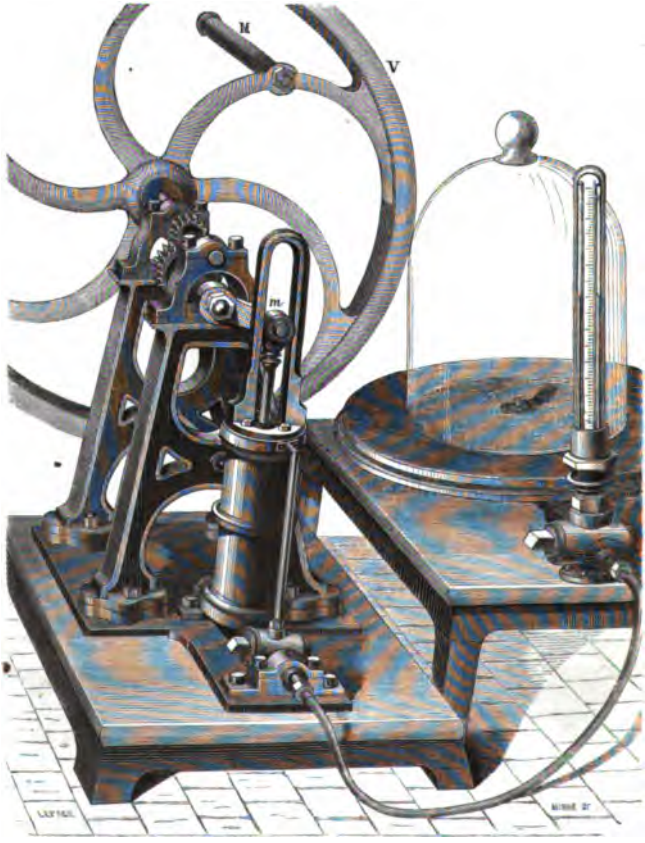


Fig. 106.

sphère, la paume de la main se gonfle, et le sang tend à sortir par les pores.

* 169. **Machine pneumatique à double effet de M. Bianchi.** — M. Bianchi, constructeur à Paris, a adopté depuis quelques années

un système de machine pneumatique qui présente plusieurs avantages. Cette machine, qui est toute en fonte, n'a qu'un seul cylindre, oscillant sur un axe horizontal fixé à sa base, comme le montre la figure 106. Sur un bâti de fonte est monté un arbre horizontal, avec un volant très-lourd V qu'on fait tourner à l'aide d'une manivelle M. A ce même arbre est fixée une manivelle *m* qui s'articule à la tête de la tige du piston. Par suite, à chaque révolution complète du volant, le cylindre fait deux oscillations sur son axe.

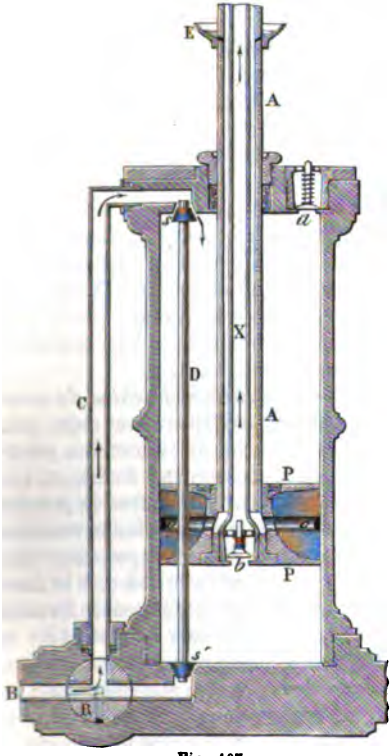


Fig. 107.

Cela posé, la machine est à double effet, c'est-à-dire que le piston PP (fig. 107) fait le vide en montant et en descendant. Pour cela, il porte une soupape *b* ouvrant de bas en haut, comme dans la machine ordinaire; mais en outre la tige AA est creuse, et dans son intérieur est un tube X, en cuivre rouge, destiné à donner issue à l'air qui sort par la soupape *b*. Au haut du cylindre est une seconde soupape *a*, ouvrant aussi de bas en haut. Enfin, une tige de fer D traverse à frottement doux le piston, et se termine à ses extrémités par deux soupapes coniques *s* et *s'*. Celles-ci servent à l'aspiration par le tube BC qui se rend au récipient où l'on fait le vide, tandis que les soupapes *a* et *b* servent au dégagement de l'air.

Ces détails connus, supposons que le piston descende. La soupape *s'* est alors fermée, et la soupape *s* étant ouverte, l'air du

récipient se rend au-dessus du piston, tandis qu'en dessous l'air comprimé par celui-ci soulève la soupape *b* et se dégage par le tube X, qui communique avec l'atmosphère. Quand le piston remonte, l'aspiration se fait par *s'*, et la soupape *s* étant fermée, l'air comprimé se dégage par la soupape *a*.

La machine possède un robinet à double épuisement R, semblable à celui déjà décrit (167). Elle est en outre munie d'un système de graissage très-ingénieux. Pour cela, un godet E fixé à la tige est rempli d'huile qui tombe dans l'espace annulaire compris entre la tige AA et le tube X; de là elle se rend dans un petit tube *oo* réservé dans la masse du piston, et refoulée par la pression atmosphérique, elle s'y distribue d'une manière permanente sur le pourtour du piston. La machine contient encore plusieurs détails de construction importants, qu'il nous est impossible de décrire ici. Bornons-nous à observer qu'étant toute en fonte, elle peut recevoir des dimensions beaucoup plus grandes que la machine ordinaire à deux pistons, et faire le vide en bien moins de temps, dans des appareils beaucoup plus grands.

170. **Machine de compression.** — On nomme *machine de compression* un appareil qui sert à comprimer l'air ou tout autre gaz. Comme elle ne diffère pas, quant à la forme, de la machine pneumatique déjà décrite (fig. 99), nous nous bornerons à donner ici une coupe longitudinale de cette machine, afin de montrer le jeu des soupapes, qui ouvrent de haut en bas, tandis que dans la machine pneumatique elles ouvrent de bas en haut. Ces soupapes, dont l'une est représentée en *a*, à la base du piston, et l'autre en *o*, à la base du corps de pompe (fig. 108), sont coniques et maintenues fermées par de petits ressorts à boudin. Lorsque le piston P monte, l'air se raréfie en dessous, la soupape *o* reste fermée par le ressort à boudin, et la soupape *a* s'ouvre par l'effet de la pression atmosphérique, ce qui permet à l'air extérieur de rentrer dans le corps de pompe. Lorsque le piston descend, l'air qui est au-dessous se comprime, la soupape *a* se ferme, tandis que la soupape *o* s'ouvre et donne passage à l'air refoulé, qui se rend dans le récipient R. A chaque coup de piston, la masse d'air que contient le corps de pompe pénètre ainsi dans le récipient. Toutefois, il y a une limite à la tension que peut prendre le gaz comprimé, car il arrive un moment où l'air qui est dans le corps de pompe n'acquiert plus, même lorsque le piston est au bas de sa course, une force élastique supérieure à celle qui a lieu dans le récipient, et dès lors il ne passe plus d'air dans celui-ci, les soupapes ne s'ouvrant plus.

Dans la machine de compression, la tension de l'air se mesure au moyen d'un petit manomètre à air comprimé (154) communiquant avec le récipient. Enfin, dans cette machine, le récipient doit être fortement fixé à la platine, sinon il serait soulevé par l'élasticité du gaz. Pour cela, il est formé d'un manchon cylindrique de verre, ouvert aux deux extrémités, dont les bords sont bien dressés. D'une part, il s'appuie sur la platine A, et, de l'autre, il est fermé par une seconde platine de glace B, percée de quatre trous,

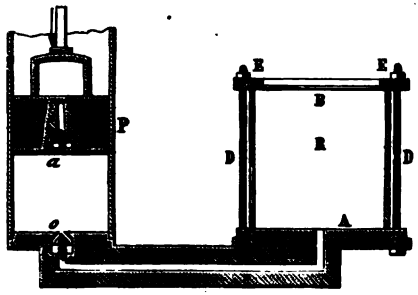


Fig. 108.

dans lesquels passent quatre boulons de fer D fixés sur la platine. Au moyen de ces boulons et d'écrous E, on serre la glace B sur le cylindre. Pour prévenir les accidents qui pourraient avoir lieu si le cylindre était brisé par la tension du gaz comprimé, on l'entoure d'un grillage en fil de fer.

La machine de compression qui vient d'être décrite a peu d'applications. Sous la forme suivante, elle est au contraire d'un fréquent usage.

171. **Pompe de compression.** — La *pompe de compression*, qui est une véritable pompe foulante, se compose simplement d'un corps de pompe A d'un petit diamètre (fig. 110), dans lequel on fait mouvoir, avec la main, au moyen d'une poignée, un piston plein, c'est-à-dire sans soupape. Le corps de pompe se termine par un pas de vis qui permet de le fixer sur un récipient K, dans lequel il s'agit de comprimer de l'air ou tout autre gaz. La figure 109 montre la disposition des soupapes, qui sont construites de manière que la soupape latérale *o* ouvre de dehors en dedans, et la soupape inférieure *s*, de dedans en dehors. De petits ressorts à boudin appuient sur ces soupapes pour les maintenir fermées. Le

jeu des soupapes est le même que dans la machine de compression.

Dans la pompe de compression, comme dans la machine précédente, la limite de compression dépend du rapport qui existe entre les deux volumes d'air sous le piston, quand il est au haut et au bas de sa course. Si le second volume est, par exemple, un 60e du premier, on ne pourra comprimer l'air que jusqu'à 60 atmosphères; car, au delà, la tension, dans le récipient K, serait plus grande que dans le corps de pompe, et alors la soupape inférieure de celui-ci ne pourrait s'ouvrir pour donner passage à une nouvelle quantité d'air.

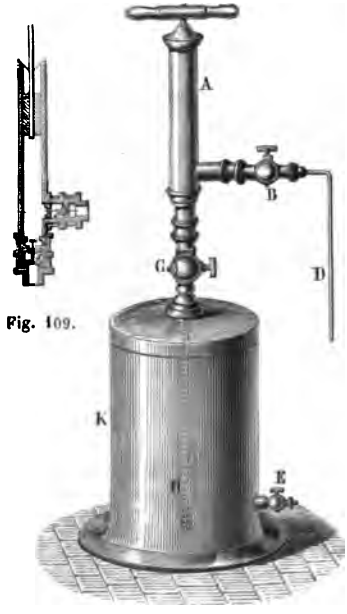


Fig. 109.

Fig 110 (h = 62).

Cet appareil sert surtout à faire absorber les gaz par l'eau. Pour cela, on fait communiquer le robinet B, au moyen d'un tube D, avec un réservoir plein du gaz qu'on veut dissoudre, par exemple, plein d'acide carbonique; la pompe aspire ce gaz et le refoule dans le vase K, où il se dissout en quantité d'autant plus grande qu'il est plus comprimé (158, 1°). C'est à l'aide d'appareils analogues que sont fabriquées les eaux gazeuses artificielles.

* 172. **Fontaine de Héron.** — La *Fontaine de Héron* tire son nom de celui de son inventeur, qui vivait à Alexandrie 120 ans avant l'ère chrétienne. Elle se compose d'une cuvette de cuivre D (fig. 111) et de deux ballons de verre M et N, de 2 à 3 décimètres de diamètre. La cuvette est en communication avec la partie inférieure du ballon N par un long tube de cuivre B. Un second tube A fait communiquer entre eux les deux ballons. Enfin, un troisième tube plus petit traverse la cuvette et se rend à la partie inférieure du ballon M. Ce troisième tube se retire pour remplir d'eau à moitié ce même ballon. Puis, replaçant le tube, on verse

de l'eau dans la cuvette. Le liquide descend, par le tube B, dans le ballon inférieur et en chasse l'air, qui est refoulé dans le ballon supérieur. Là, l'air comprimé réagit sur l'eau et la fait jaillir comme le montre la figure. Sans la résistance de l'air et le frotte-

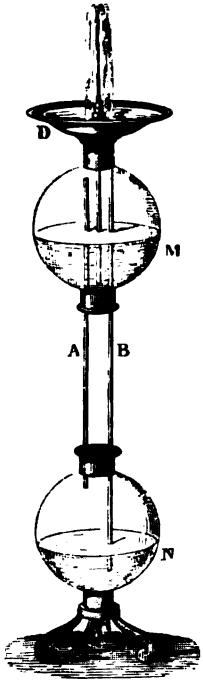


Fig. 111 (h = 1m,17).

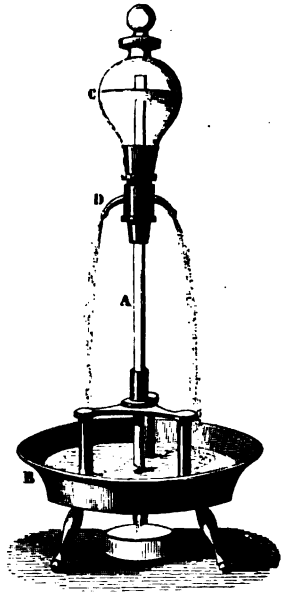


Fig. 112 (h = 65).

ment, le liquide s'élèverait, au-dessus de la cuvette, à une hauteur égale à la différence de niveau dans les deux ballons.

Le principe de la fontaine de Héron a trouvé une application dans les lampes hydrostatiques de Girard.

Les appareils que nous venons de décrire sont fondés sur la force élastique de l'air; les suivants le sont, en outre, sur la pression atmosphérique.

* 173. **Fontaine intermittente.** — La *fontaine intermittente*

est formée d'un globe de verre C (fig. 112) hermétiquement fermé par un bouchon à l'émeri, et portant deux ou trois tubulures capillaires D par lesquelles se fait l'écoulement. Un tube de cristal A, ouvert à ses extrémités, pénètre par l'une dans le globe C, et par l'autre il vient se terminer près d'un orifice central pratiqué dans une cuvette de cuivre B qui porte tout l'appareil.

Le globe C étant rempli d'eau aux deux tiers environ, le liquide s'écoule d'abord par les orifices D, comme le montre la figure, la pression intérieure, en D, étant égale à celle de l'atmosphère qui se transmet par la partie inférieure du tube de cristal, plus au poids de la colonne d'eau CD, tandis qu'extérieurement, au même point, la pression est seulement celle de l'atmosphère. Ces conditions persistent tant que l'orifice inférieur du tube est ouvert, c'est-à-dire tant que la tension de l'air, à l'intérieur, est égale à la pression de l'atmosphère, puisque l'air rentre à mesure que l'eau s'écoule; mais l'appareil étant réglé de manière que l'orifice pratiqué au fond de la cuvette B laisse écouler moins d'eau que n'en donnent les tubulures D, le niveau s'élève peu à peu dans la cuvette, et le tube finit par plonger entièrement dans le liquide. L'air extérieur ne pouvant plus alors rentrer dans le globe C, l'air s'y raréfie à mesure que l'écoulement continue, et il vient un moment où la pression due à la colonne d'eau CD et à la tension de l'air renfermé dans l'appareil est égale à la pression extérieure qui s'exerce en D. Par conséquent, l'écoulement s'arrête. Or, la cuvette continuant à se vider, le bout inférieur du tube A se trouve bientôt dégagé. L'air rentre alors, l'écoulement recommence, et ainsi de suite tant qu'il reste de l'eau dans le globe C.

Fig. 113 (h — 40).

174. Siphon. — Le *siphon* est un tube recourbé, à branches inégales, qui sert à transvaser les liquides par-dessus les bords des vases; c'est la branche la plus courte qui plonge dans le liquide à transvaser (fig. 113).

Pour faire usage de cet instrument, on commence par l'*amorcer*,

c'est-à-dire par le remplir de liquide. Pour cela, on le retourne et on l'emplit directement; puis, fermant momentanément ses deux orifices, on le remet en place comme le montre la figure; ou bien, plongeant la petite branche dans le liquide, on aspire avec la bouche, par l'orifice B, l'air qui est dans l'appareil. Le vide se faisant alors dans celui-ci, le liquide du vase C est refoulé dans le tube par l'effet de la pression atmosphérique et le remplit.

Lorsque le liquide à transvaser n'est pas de nature à être intro-

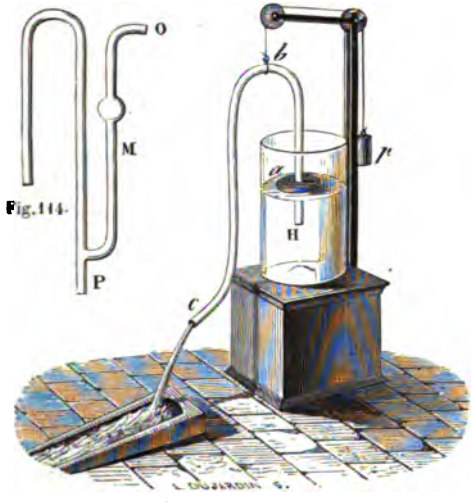


Fig. 115 (h = 55).

duit dans la bouche, on fait usage d'un siphon auquel est soudé un second tube M (fig. 114) parallèle à la grande branche. C'est alors par l'orifice O de ce tube additionnel qu'on aspire l'air, en ayant soin de fermer en même temps l'orifice P, et de ne pas laisser le liquide s'élever, dans le tube additionnel, jusqu'à la bouche. De quelque manière que le siphon ait été rempli, l'écoulement se continue de la petite branche vers la grande, tant que la première plonge dans le liquide.

Pour concevoir comment cet écoulement a lieu, il faut remarquer que la force qui presse le liquide en C (fig. 113) et le sollicite à s'écouler dans la direction CMB, égale la pression atmosphérique, moins le poids d'une colonne d'eau dont la hauteur est DC. De

même, en B, la force qui sollicite le liquide dans la direction BMC est le poids de l'atmosphère, moins celui d'une colonne d'eau ayant pour hauteur AB. Or, cette dernière colonne étant plus grande que DC, il en résulte que la force effective qui agit en B est plus petite que celle qui agit en C. L'écoulement a donc lieu en vertu de la différence de ces deux forces. Par conséquent, la vitesse d'écoulement sera d'autant plus grande que la différence de niveau entre l'orifice B et la surface du liquide dans le vase C sera plus grande.

On conclut de la théorie du siphon qu'il ne marcherait pas dans le vide, ou encore si la hauteur CD était plus grande que la colonne liquide qui fait équilibre à la pression atmosphérique.

175. **Siphon à écoulement constant.** — D'après ce qui précède, pour que l'écoulement soit constant dans le siphon, il faut que la différence entre les hauteurs du liquide, dans les deux branches, soit toujours la même. On obtient ce résultat en disposant l'appareil comme le montre la figure 115. Le siphon est maintenu en équilibre par un flotteur *a* et par un poids *p*, de manière qu'à mesure que le niveau baisse dans le vase H, le siphon descende avec lui ; la différence entre les hauteurs *ab* et *bc* demeure donc invariable.

176. **Siphon intermittent.** — Le *siphon intermittent*, ainsi que son nom l'indique, est celui dans lequel l'écoulement n'est pas continu. Ce siphon est disposé dans un vase de manière que la branche la plus courte s'ouvre près du fond, tandis que la plus grande le traverse et s'ouvre en dehors (fig. 116). Le vase étant alimenté par une source d'eau constante, le niveau s'y élève peu à peu, et, en même temps, dans la petite branche, jusqu'au sommet du siphon. Celui-ci s'amorce alors par l'effet de la pression du liquide, et l'écoulement s'opère comme le montre la figure ci-dessus. Or, comme on a soin que l'écoulement du siphon soit plus rapide que celui du tube qui alimente le vase, le niveau baisse dans celui-ci, et la petite branche cesse bientôt de plonger; le siphon se vide alors, et l'écoulement est interrompu. Mais le vase continuant à être alimenté par la source constante, le niveau s'élève de nouveau, et la même série de phénomènes se renouvelle périodiquement.

Fig. 116.

Dans les établissements destinés à la distribution des eaux à

travers les différents quartiers d'une ville, on a souvent recours à des écoulements intermittents pour ouvrir ou fermer, à des heures déterminées, les robinets des conduits. A cet effet, des vases alimentés par un filet d'eau constant se vident par intervalles, et, devenant ainsi tantôt plus lourds, tantôt plus légers, ils agissent, à l'aide de contre-poids, dans un sens, puis dans un autre, sur les clefs des robinets.

La théorie du siphon intermittent donne l'explication des fontaines intermittentes naturelles qu'on observe dans plusieurs contrées. Il est de ces fontaines qui donnent de l'eau pendant plusieurs jours ou plusieurs mois, puis s'arrêtent pendant un intervalle plus ou moins long, et recommencent ensuite à couler; d'autres s'arrêtent et reprennent leur écoulement plusieurs fois dans une heure.

On explique ces phénomènes en admettant des cavités souterraines qui se remplissent plus ou moins lentement d'eau par des sources, et qui se vident ensuite par des fissures disposées dans le sol de manière à faire siphon intermittent.

177. **Différentes espèces de pompes.** — Les *pompes* sont des machines qui servent à élever l'eau par aspiration, par pression ou par les deux effets combinés; de là leur division en *pompe aspirante*, *pompe foulante*, *et pompe aspirante et foulante*. Avant Galilée, on attribuait l'ascension de l'eau dans les pompes aspirantes à l'*horreur de la nature pour le vide;* mais ce phénomène est simplement un effet de la pression atmosphérique.

178. **Pompe aspirante.** — La figure 117 représente un modèle de pompe aspirante destinée à la démonstration, mais offrant les mêmes dispositions que les pompes usitées dans l'industrie. Elle se compose : 1° d'un *corps de pompe* cylindrique B, de verre, à la base duquel est une soupape S, ouvrant de bas en haut; 2° d'un *tube d'aspiration* A, qui plonge dans le réservoir d'où l'on veut élever l'eau; 3° d'un *piston* qu'une tige fait monter ou descendre dans le corps de pompe, et qui est percé d'un trou dont l'orifice supérieur est recouvert par une soupape O ouvrant aussi de bas en haut. Une *brimbale* P sert à mettre la tige et le piston en mouvement.

Lorsque le piston, d'abord au bas de sa course, s'élève, le vide tend à se faire au-dessous, et la soupape O reste fermée par la pression atmosphérique, tandis que l'air du tuyau A, en vertu de son élasticité, soulève la soupape S, et passe en partie dans le corps de pompe. L'air étant ainsi raréfié, l'eau monte dans le tuyau jusqu'à ce que la pression de la colonne liquide soulevée, ajoutée

à la tension de l'air raréfié qui reste dans le tube, fasse équilibre à la pression atmosphérique qui s'exerce sur l'eau du réservoir.

Lorsque le piston descend, la soupape S se ferme par son propre poids, et s'oppose au retour de l'air du corps de pompe dans le tube d'aspiration. L'air, comprimé par le piston, fait alors ouvrir la soupape O, et se dégage dans l'atmosphère par le tuyau C, qui est au-dessus du corps de pompe et qu'on nomme *tuyau d'ascension*. A un deuxième coup de piston, la même série de phénomènes se reproduit, et, après quelques coups, l'eau pénètre enfin dans le corps de pompe. A partir de ce moment, l'effet produit est modifié. Pendant la descente du piston, la soupape S se ferme, l'eau comprimée soulève la soupape O et pénètre au-dessus du piston, qui la soulève ensuite, lorsqu'il remonte, jusqu'au réservoir supérieur D. Alors, il n'y a plus d'air dans le corps de pompe, et l'eau, poussée par la pression atmosphérique, monte avec le piston, à moins qu'au sommet de sa course il ne soit à plus de 10m,3 au-dessus du niveau de l'eau dans le réservoir où plonge le tuyau d'aspiration A, car on a vu (136) qu'une colonne d'eau de 10m,3 fait équilibre à la pression atmosphérique.

Fig. 117 (h = 75).

Pour connaître la hauteur qu'on peut donner au tube d'aspiration A, il faut observer que, dans la pratique, le piston ne s'applique jamais exactement sur la base du corps de pompe, et que lorsqu'il est au plus bas de sa course, il existe encore au-dessous de lui un *espace nuisible* rempli d'air à la pression atmosphérique. Soit cet espace nuisible égal à $\frac{1}{30}$ du volume de corps de pompe.

L'air qui est dans l'espace nuisible se dilate à mesure que le piston remonte, et lorsque celui-ci est arrivé au haut de sa course, la tension de l'air qui reste dans le corps de pompe est $\frac{1}{30}$ de la pression atmosphérique, d'après la loi de Mariotte. L'air du tuyau d'aspiration ne peut donc être raréfié au delà de cette limite, et, par conséquent, dans ce tube, l'eau ne peut s'élever, dans le cas que nous considérons, qu'à une hauteur égale au $\frac{29}{30}$ de $10^m,3$; c'est-à-dire à $9^m,9$. Cette hauteur est encore trop grande, puisque l'eau doit s'élever d'une certaine quantité au-dessus de la soupape S. Aussi, en général, le tube d'aspiration n'a-t-il pas plus de 8 mètres.

En résumé, dans la pompe aspirante, l'eau est élevée d'abord dans le tuyau d'aspiration par l'effet de la pression atmosphérique, et la hauteur ainsi obtenue ne saurait dépasser 8 à 9 mètres. Mais une fois que l'eau a passé au-dessus du piston, c'est la force ascensionnelle de celui-ci qui l'élève, et la hauteur qu'elle peut alors atteindre ne dépend que de la force qui fait mouvoir le piston.

179. **Pompe aspirante et foulante.** — La pompe aspirante et foulante élève l'eau à la fois par aspiration et par pression. Elle diffère peu de celle qui vient d'être décrite; seulement, son piston est plein. A la base du corps de pompe, sur l'orifice du tube d'aspiration, est encore une soupape S (fig. 118) ouvrant de bas en haut. Une autre soupape O, ouvrant dans le même sens, ferme l'ouverture d'un tube coudé, qui, partant d'un trou *o* pratiqué près de la soupape S, vient, en dessous du plateau *a*, se terminer dans un vase M qu'on nomme *réservoir d'air*. Enfin, de ce réservoir part un tube d'ascension D, destiné à élever l'eau à une hauteur plus ou moins considérable.

A chaque ascension du piston B, l'eau monte dans le tube d'aspiration A, et pénètre dans le corps de pompe. Lorsque le piston redescend, la soupape S se ferme, et l'eau comprimée soulève la soupape O pour passer dans le réservoir M, et de là dans le tuyau d'ascension D, dans lequel la hauteur qu'elle peut atteindre n'a d'autre limite que la force du moteur qui fait jouer la pompe.

Si le tuyau D était le prolongement du tube de communication *Jao*, l'écoulement serait intermittent, n'ayant lieu que quand le piston descend, et s'arrêtant aussitôt qu'il remonte. Mais entre ces deux tubes il y a solution de continuité, ce qui, au moyen de l'air renfermé dans le réservoir M, permet d'obtenir un écoulement continu. En effet, l'eau refoulée dans le réservoir M se partage en deux parties, dont l'une, s'élevant dans le tube D, comprime, par son poids, l'eau qui est dans le réservoir, tandis que l'autre, en vertu de

cette pression, s'élève dans le réservoir au-dessus de l'orifice inférieur du tube D, en comprimant l'air qui est au-dessus d'elle. Par conséquent, lorsque le piston remonte et n'agit plus pour refouler l'eau, c'est l'air du réservoir qui, par l'excès de pression qu'il a

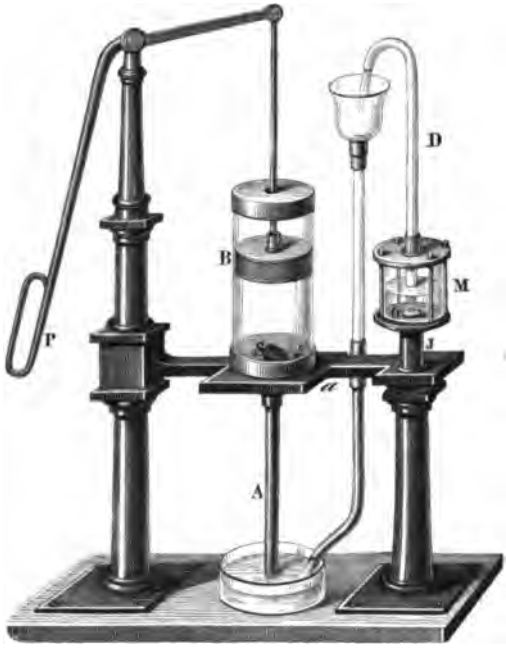


Fig. 118 (h = 75).

reçu, réagit sur le liquide et l'élève dans le tube D, jusqu'à ce que le piston descende de nouveau, en sorte que le jet est continu.

180. **Pompe foulante.** — La *pompe foulante* n'agit que par pression et n'utilise pas le poids de l'atmosphère. Cette pompe ne diffère de la précédente que parce qu'elle n'a pas de tuyau d'aspiration, son corps de pompe plongeant dans l'eau même qu'on veut élever. La continuité du jet s'obtient par un réservoir d'air semblable à celui qui vient d'être décrit, ou bien par un système de deux pompes accouplées, agissant alternativement : telles sont les pompes à incendie.

181. Charge que porte le piston. — Dans la pompe aspirante (fig. 117), une fois que l'eau remplit le tuyau d'aspiration et le corps de pompe jusqu'à l'orifice d'écoulement, *l'effort nécessaire pour soulever le piston égale le poids d'une colonne d'eau qui aurait pour base le piston et pour hauteur la distance verticale de l'orifice d'écoulement au niveau de l'eau dans le réservoir où l'on puise, c'est-à-dire la hauteur à laquelle l'eau est élevée.* En effet, soit H la pression atmosphérique, h la hauteur de l'eau, en C, au-dessus du piston, et h' la hauteur de la colonne d'eau qui remplit le tube d'aspiration A et la partie inférieure du corps de pompe. La pression au-dessus du piston est évidemment $H + h$, et celle au-dessous $H - h'$, puisque le poids de la colonne h' tend à faire équilibre à la pression atmosphérique. Or, la pression $H - h'$ tend à soulever le piston, la résistance effective est donc égale à l'excès de $H + h$ sur $H - h'$; c'est-à-dire à $h + h'$, ce qu'il fallait démontrer.

Dans la pompe aspirante et foulante (fig. 118), il est facile de voir que la pression que supporte le piston est aussi égale au poids d'une colonne d'eau qui aurait pour base la section du piston, et pour hauteur celle à laquelle l'eau est élevée.

*** 182. Flacon de Mariotte, son usage.** — *Le flacon de Mariotte* est un appareil qui offre plusieurs effets remarquables de pression atmosphérique, et au moyen duquel on obtient un écoulement constant. C'est un flacon un peu grand dont le goulot est fermé d'un bouchon (fig. 119). Dans celui-ci passe un tube de verre ouvert à ses deux bouts. Sur le côté du flacon sont trois tubulures a, b, c, chacune à orifice étroit et fermé par un petit tampon de bois.

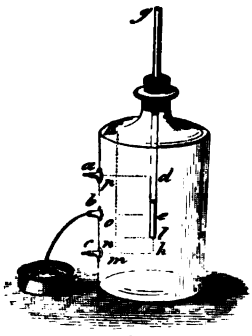


Fig. 119 (h — 44).

Le flacon et le tube étant entièrement remplis d'eau, considérons ce qui se passe lorsqu'on ouvre successivement une des tubulures a, b, c, en supposant, comme le montre la figure, que l'extrémité inférieure du tube g s'arrête entre les deux tubulures b et c.

1° Si l'on ouvre d'abord la tubulure b, il y a écoulement, le niveau baisse dans le tube g, et aussitôt que ce niveau y est le même qu'en b l'écoulement s'arrête. Ces phénomènes s'expliquent par l'excès de pression qui avait d'abord lieu en b, de dedans en dehors; excès de pression qui disparaît lorsque le niveau est le même dans le tube g qu'en b. En effet, avant que l'écoulement commençât, la pression sur tous les points de la tranche horizontale be n'était pas la même. En e, elle se composait de la pression atmosphérique, plus le poids de la colonne d'eau ge, tandis qu'en b, la pression est seulement égale à celle de l'atmosphère. Mais une fois que le niveau est le même en e et en b, il y a équilibre, parce que, dans le flacon et dans le tube, la pression est alors la même sur tous les points de la tranche horizontale be (81,3°). En effet, la pression qui s'exerce, dans ce cas, en b et en e, étant égale à celle de l'atmosphère, il est facile de démontrer que c'est la même pression qui s'exerce en un point quelconque o de la tranche be. Pour cela, représentons par H la pression de l'atmosphère; cette force agissant directement en b et en e, se transmet en tous sens dans l'intérieur du flacon, d'après le principe de Pascal (80), et la paroi k supporte de bas en haut une pression égale à $H - ko$; car le poids de la colonne d'eau ko détruit en partie la pression qui tend à se transmettre en k. Or, d'après le principe de mécanique que *la réaction est toujours égale et contraire à l'action*, la pression $H - ko$ est renvoyée de haut en bas, par la paroi k, sur la tranche be; en sorte que

la molécule *o* supporte, en réalité, deux pressions, l'une égale au poids de la colonne d'eau *ko*, l'autre à la pression H — *ko*, résultant de la réaction de la paroi *k*. La pression réelle que supporte la molécule *o* est donc *ko* + H — *ko*, ou H, ce qu'il fallait démontrer.

2° Si l'on ferme la tubulure *b* et qu'on ouvre la tubulure *a*, il n'y a pas écoulement; au contraire, l'air rentre dans le flacon par l'orifice *a*, et l'eau remonte dans le tube *g* jusqu'à la tranche *ad*; à ce moment l'équilibre est rétabli. En effet, il est facile de reconnaître, par un raisonnement semblable au précédent, que la pression est alors la même sur tous les points de la tranche horizontale *ad*.

3° Les orifices *a* et *b* étant fermés, on ouvre l'orifice *c*. Dans ce cas il y a écoulement avec une vitesse constante, tant que le niveau de l'eau, dans le flacon, n'est pas descendu au-dessous de l'orifice *l* du tube; l'air rentre alors bulle à bulle par cet orifice et gagne la partie supérieure du flacon, où il prend la place de l'eau qui s'écoule.

Pour démontrer que l'écoulement est constant par l'orifice *c*, il faut faire voir que la pression qui s'exerce sur la tranche horizontale *ch* est invariablement égale à la pression de l'atmosphère augmentée de celle de la colonne d'eau *hl*. Supposons, en effet, que dans le flacon, le niveau de l'eau se soit abaissé jusqu'à la tranche *ad*. L'air qui a pénétré dans le flacon supporte alors une pression égale à H — *pn*. En vertu de son élasticité, l'air renvoie cette pression à la couche *ch*. Or, celle-ci supporte en outre le poids de la colonne d'eau *pm*. Donc la pression transmise en *m* est en réalité *pm* + H — *pn*, ou H + *mn*, c'est-à-dire H + *hl*. On démontrerait de la même manière que cette pression est encore la même lorsque le niveau s'est abaissé en *eb*, et ainsi de suite tant que le niveau est plus haut que l'orifice *l*; la pression sur la tranche *ch* est donc constante, et, par conséquent, la vitesse d'écoulement. Mais une fois que le niveau est descendu au-dessous du point *l*, cette pression décroît, et, par suite, la vitesse.

D'après ce qui précède, le flacon de Mariotte donne le moyen d'obtenir un écoulement constant; pour cela, on le remplit d'eau et on tient ouverte la tubulure placée au-dessous de l'orifice *l* du tube. La vitesse d'écoulement est alors proportionnelle à la racine carrée de la hauteur *lh*.

LIVRE V

ACOUSTIQUE

CHAPITRE PREMIER

PRODUCTION, PROPAGATION ET RÉFLEXION DU SON.

183. **Objet de l'acoustique.** — L'*acoustique* a pour objet l'étude des sons et celle des vibrations des corps élastiques.

La musique considère les sons par rapport aux sentiments et aux passions qu'ils peuvent exciter en nous; l'acoustique ne traite que des propriétés des sons, abstraction faite des sensations que nous en éprouvons.

184. **Son et bruit.** — Le *son* est une sensation particulière excitée dans l'organe de l'ouïe par le mouvement vibratoire des corps, lorsque ce mouvement peut se transmettre à l'oreille à l'aide d'un milieu intermédiaire.

Tous les sons ne sont point identiques : ils présentent des différences assez sensibles pour qu'on puisse les distinguer entre eux, les comparer et déterminer leurs rapports.

On distingue, en général, le son d'avec le *bruit*. Le son proprement dit, ou *son musical*, est celui qui produit une sensation continue et dont on peut apprécier la valeur musicale; tandis que le bruit est un son d'une durée trop courte pour être bien apprécié, comme le bruit du canon; ou bien, c'est un mélange confus de plusieurs sons discordants, comme le roulement du tonnerre, le bruit des vagues. Toutefois, la différence entre le son et le bruit n'est pas nettement tranchée; il est, dit-on, des oreilles assez bien organisées pour déterminer la valeur musicale du bruit produit par une voiture roulant sur le pavé.

185. **Cause du son.** — Le son est toujours le résultat d'oscillations rapides imprimées aux molécules des corps élastiques, lorsque, sous l'influence d'un choc ou du frottement, l'état d'équilibre

de ces molécules a été troublé. Elles tendent alors à reprendre leur position première, mais elles n'y reviennent qu'en exécutant, en deçà et au delà de cette position, des mouvements vibratoires ou de *va-et-vient* extrêmement rapides, dont l'amplitude décroît très-vite.

On nomme *corps sonore* celui qui rend un son, et on nomme *oscillation* ou *vibration simple* le mouvement qui ne comprend qu'une *allée* ou qu'un *retour* des molécules vibrantes; une *vibration double* ou *complète* comprend l'*allée* et le *retour*. Les vibrations sont faciles à constater par l'expérience : qu'on projette une poussière légère sur un corps qui rend un son, cette poussière prend un mouvement rapide, et rend ainsi visibles les vibrations du corps; de même, si l'on pince une corde tendue et un peu longue, ses vibrations sont apparentes à l'œil.

Fig. 120.

186. Le son ne se propage pas dans le vide. — Les vibrations des corps élastiques ne peuvent faire naître en nous la sensation du son que par l'intermédiaire d'un milieu pondérable, interposé entre l'oreille et le corps sonore, et vibrant avec lui. Ce milieu est ordinairement l'air; mais les gaz, les vapeurs, les liquides, les solides, transmettent aussi le son.

Pour démontrer que la présence d'un milieu pondérable est nécessaire à la propagation du son, on fait l'expérience suivante : sous la cloche d'une machine pneumatique, on place un timbre métallique que frappe, d'une manière continue, un petit marteau mû par un mouvement d'horlogerie (fig. 120). Tant que la cloche est pleine d'air à la pression ordinaire, on entend distinctement résonner le timbre sous les coups du petit marteau; mais, à mesure qu'on raréfie l'air, le son perd de son intensité, et il cesse d'être perceptible lorsque le vide est fait. Donc le son ne se propage pas dans le vide.

Pour que l'expérience réussisse bien, il faut disposer la sonnerie sur de la ouate; car les pièces métalliques dont cette sonnerie est formée peuvent transmettre leurs vibrations à la platine de la machine pneumatique, et celle-ci à l'air.

On peut faire la même expérience d'une manière plus simple, à l'aide d'un ballon de verre à robinet, contenant une petite sonnette suspendue à un fil. Si l'on agite le ballon lorsqu'il est plein d'air, on entend distinctement la sonnette; mais après qu'on a raréfié l'air qu'il renferme, au moyen de la machine pneumatique, on n'entend plus rien.

187. **Le son se propage dans tous les corps élastiques.** — Si, dans les deux expériences ci-dessus, après avoir fait le vide, on laisse rentrer, dans le récipient ou dans le ballon, un gaz quelconque, ou une vapeur, on entend très-bien le son du timbre ou de la sonnette, ce qui démontre que le son se propage dans les gaz et dans les vapeurs, comme dans l'air.

Le son se propage également dans les liquides. En effet, lorsque deux corps se heurtent sous l'eau, on entend distinctement le choc. Un plongeur qui est au fond de l'eau peut entendre ce qui se dit sur le rivage.

Quant aux solides, leur conductibilité est telle qu'un bruit extrêmement léger, comme le frottement d'une barbe de plume, produit à l'extrémité d'une pièce de bois, est entendu à l'autre extrémité. Le sol conduit si bien le son que, la nuit, en appliquant l'oreille contre terre, on peut entendre, à de grandes distances, des pas de chevaux ou tout autre bruit.

188. **Mode de propagation du son dans l'air.** — Pour simplifier la théorie de la propagation du son, considérons d'abord le cas où

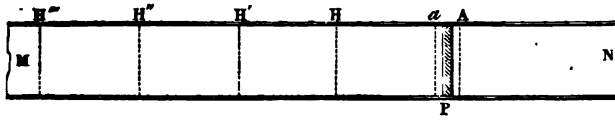


Fig. 121.

il se propagerait dans un tube cylindrique indéfini. Soit donc un tube MN (fig. 121), rempli d'air à une pression et à une température constantes, et, dans ce tube, un piston P oscillant avec une grande vitesse de A en *a*, et réciproquement. Ce piston, lorsqu'il passe de A en *a*, comprime l'air que contient le tube. Or, en raison de la grande compressibilité de ce fluide, la condensation ne s'opère

pas dans toute la longueur du tube, mais seulement sur une certaine longueur *a*H, qu'on nomme l'*onde condensée*.

Toutes les parties de l'onde condensée ne le sont pas également, et leur vitesse n'est pas la même; car le piston, dans son mouvement de va-et-vient, est animé de vitesses variables. Sa vitesse, d'abord nulle en A, croît progressivement jusqu'au milieu de sa course, puis décroît jusqu'en *a*, où elle est nulle de nouveau. De là résultent, dans l'onde *a*H, des densités et des vitesses de l'air variables avec la vitesse du piston. En *a*, où celui-ci est au repos, la vitesse de l'air est nulle, et ce fluide a repris sa densité primitive. En H, où finit l'onde, la vitesse et la densité sont les mêmes qu'en *a*; mais, dans les points intermédiaires, ces quantités croissent depuis le point *a* jusqu'à la section moyenne de l'onde pour décroître ensuite jusqu'en H.

En concevant le tuyau MN divisé en longueurs égales à *a*H, et chacune de ces longueurs partagée en tranches parallèles au piston, on démontre, par le calcul, qu'au moment où la première tranche de l'onde *a*H arrive au repos, la première tranche de la partie HH' commence à participer au mouvement; puis, lorsque la seconde tranche de l'onde *a*H passe à l'état de repos, le mouvement se communique à la deuxième tranche de HH', et ainsi de suite de tranche en tranche dans les parties H'H'', H''H'''... L'onde condensée avance donc dans le tube, chacune de ses parties passant successivement par les mêmes degrés de vitesse et de condensation.

Le piston revenant ensuite sur lui-même dans la direction *a*A, il se produit, derrière lui, un vide dans lequel se dilate la couche d'air en contact avec sa face postérieure. Puis, la couche suivante, se dilatant à son tour, ramène la première à son état primitif de condensation, et ainsi de suite de tranche en tranche, en sorte que, lorsque le piston est revenu en A, il s'est produit une *onde dilatée* de même longueur que l'onde condensée, et la suivant immédiatement dans le tube cylindrique, où elles se propagent ensemble, les tranches correspondantes des deux ondes possédant des vitesses égales et contraires.

L'ensemble de l'onde condensée et de l'onde raréfiée forme une *ondulation*; c'est-à-dire qu'une ondulation comprend la partie de la colonne d'air modifiée pendant une allée et un retour du piston; la *longueur d'ondulation* est l'espace que le son parcourt pendant la durée d'une vibration complète du corps qui le produit. Cette longueur est d'autant moindre que les vibrations sont plus rapides.

On passe facilement de la théorie du mouvement des ondes so-

nores, dans un cylindre, à celle de leur mouvement dans un milieu indéfini dans tous les sens; il suffit pour cela d'appliquer, dans toutes les directions, à chaque molécule des corps vibrants, ce qui vient d'être dit d'un piston mobile dans un tuyau. Il se produit, en effet, autour de chaque centre d'ébranlement, une suite d'ondes sphériques alternativement condensées et raréfiées. Ces ondes étant comprises entre deux surfaces sphériques concentriques dont les rayons croissent graduellement, tandis que la longueur d'ondulation reste la même, leur masse augmente à mesure qu'elles s'éloignent du centre d'ébranlement; il en résulte que la vitesse de vibration imprimée aux molécules s'affaiblit graduellement et que l'intensité du son diminue.

Ce sont ces ondes sphériques alternativement condensées et raréfiées qui, en se propageant dans l'espace, y transmettent le son. Si plusieurs points sont ébranlés en même temps, il se produit, autour de chacun, un système d'ondes semblable au précédent. Or, toutes ces ondes se transmettent les unes à travers les autres, sans modifier ni leur longueur ni leur vitesse. Tantôt les ondes condensées ou dilatées se superposent sur des ondes de même nature, de manière à produire un effet égal à leur somme; tantôt elles se rencontrent et produisent un effet égal à leur différence. Il suffit d'ébranler en plusieurs points la surface d'une eau tranquille pour rendre sensible à l'œil la *coexistence des ondes*.

189. **Causes qui font varier l'intensité du son.** — Plusieurs causes modifient la force ou l'*intensité* du son, savoir : la distance du corps sonore, l'amplitude des vibrations, la densité de l'air dans le lieu où le son se produit, la direction des courants d'air, et, enfin, le voisinage d'autres corps sonores.

1° *L'intensité du son est en raison inverse du carré de la distance du corps sonore à l'organe auditif.* Cette loi, à laquelle on est conduit par le calcul, peut aussi se démontrer expérimentalement. Concevons, en effet, plusieurs sons exactement d'égale intensité, par exemple des timbres identiques frappés par des marteaux de même poids, tombant de hauteurs égales. Si l'on place quatre de ces timbres à une distance de 20 mètres de l'oreille, et un seul à une distance de 10 mètres, on observe que ce dernier, frappé seul, rend un son de même intensité que les quatre premiers timbres frappés simultanément, ce qui fait voir que pour une distance double l'intensité est quatre fois moindre.

2° *L'intensité du son augmente avec l'amplitude des vibrations du corps sonore.* La liaison qui existe entre l'intensité du

son et l'amplitude des vibrations se constate facilement à l'aide des cordes vibrantes; en effet, si les cordes sont un peu longues, les oscillations sont sensibles à l'œil, et on vérifie que, l'amplitude des oscillations décroissant, le son s'affaiblit.

3° *L'intensité du son dépend de la densité de l'air dans le lieu où il se produit.* Qu'on place, sous le récipient de la machine pneumatique, une sonnerie mue par un mouvement d'horlogerie, on entend l'intensité du son décroître à mesure qu'on raréfie l'air.

Dans l'hydrogène, qui est environ 14 fois moins dense que l'air, les sons ont une intensité beaucoup plus faible, quoique la pression soit la même. Dans l'acide carbonique, au contraire, dont la densité, par rapport à l'air, est 1,529, les sons deviennent plus intenses. Sur les hautes montagnes, où l'air est très-raréfié, il faut parler avec effort pour se faire entendre, et l'explosion d'une arme à feu n'y produit qu'un son faible.

4° *L'intensité du son est modifiée par l'agitation de l'air et la direction des vents.* On constate que, par un temps calme, le son se propage toujours mieux que lorsqu'il fait du vent, et qu'en ce dernier cas le son est plus intense, à distance égale, dans la direction du vent que dans la direction contraire.

5° Enfin, *le son est renforcé par le voisinage d'un corps sonore.* Une corde d'instrument, tendue à l'air libre, ne rend qu'un son faible lorsqu'on la fait vibrer loin de tout corps sonore; qu'elle soit tendue au-dessus d'une caisse sonore, comme dans la guitare, le violon ou la basse, elle rend un son plein et intense, ce qui est dû à ce que la caisse et l'air qu'elle contient vibrent à l'unisson avec la corde. De là l'emploi des caisses sonores dans les instruments à cordes.

* 190. **Appareil pour renforcer le son.** — Pour démontrer l'influence des caisses remplies d'air sur le renforcement du son, Savart a construit l'appareil représenté dans la figure 122. C'est un vase hémisphérique A, en airain, qu'on fait vibrer à l'aide d'un fort archet; auprès est placé un cylindre creux B, en carton, ouvert à l'extrémité antérieure et fermé à l'autre. Au moyen d'une poignée, on tourne, à volonté, ce cylindre sur son support, qui est fixé sur une pièce C glissant librement dans le pied de l'appareil, en sorte qu'on peut écarter à volonté le cylindre B du vase A. L'appareil étant disposé comme le montre la figure, lorsqu'on le fait vibrer, les sons qu'il rend prennent une force et une rondeur dont on ne peut se faire une idée qu'en les entendant. Mais le son perd presque toute son intensité si l'on tourne le cylindre, et il s'affaiblit gra-

duellement lorsqu'on le recule, ce qui démontre que le renforcement du son est dû aux vibrations de l'air contenu dans le cylindre. Dans cet appareil, le cylindre B doit avoir une profondeur déterminée, pour que l'air qu'il contient vibre à l'unisson avec le vase d'airain, sinon celui-ci vibrerait seul.

Vitruve rapporte que chez les anciens on plaçait, sur les théâtres, des vases résonnants, en airain, pour renforcer la voix des acteurs.

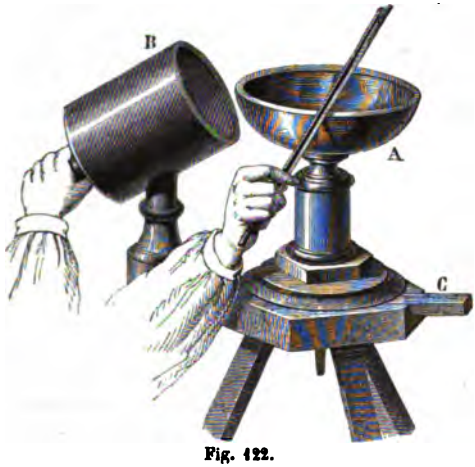


Fig. 122.

191. Influence des tuyaux sur l'intensité du son. — La loi énoncée ci-dessus, que l'intensité du son est en raison inverse du carré de la distance, n'est pas applicable aux sons transmis par des tuyaux, surtout si ceux-ci sont cylindriques et droits. Les ondes sonores ne se propageant plus alors sous la forme de sphères concentriques croissantes, le son peut être porté à une distance considérable sans altération bien sensible. M. Biot a constaté que dans un tuyau de conduite des eaux de Paris, long de 951 mètres, la voix perd si peu de son intensité, que, d'une extrémité à l'autre de ce tube, on peut entretenir une conversation à voix basse. Toutefois, l'affaiblissement du son devient sensible dans les tubes d'un grand diamètre, ou dont les parois présentent des anfractuosités. C'est ce qu'on observe dans les souterrains et dans les longues galeries.

Cette propriété qu'ont les tubes de porter au loin les sons, a été utilisée d'abord en Angleterre. Des *speaking tube* (tubes parlants) y ont été appliqués à transmettre les ordres dans les hôtels et dans les grands établissements. Ce sont des tubes de caoutchouc, d'un petit diamètre, passant d'une pièce à l'autre à travers les murs. Si l'on parle d'une voix peu élevée à l'une des extrémités, on est entendu très-distinctement à l'autre.

D'après les expériences déjà citées de M. Biot, il est évident qu'on pourrait ainsi, à l'aide de tubes acoustiques, correspondre de vive voix d'une ville à l'autre. Le son parcourant en moyenne 337 mètres par seconde, une distance de 20 lieues de 4000 mètres serait parcourue en 4 minutes.

192. **Vitesse du son dans les gaz.** — La propagation des ondes sonores étant successive, le son ne doit se transmettre d'un lieu à un autre que dans un intervalle de temps plus ou moins long. C'est ce que démontrent un grand nombre de phénomènes. Par exemple, le bruit de la foudre ne se fait entendre qu'un certain temps après qu'on a vu l'éclair, bien que le bruit et l'éclair se produisent simultanément dans la nue.

De nombreuses tentatives ont été faites pour déterminer la vitesse du son dans l'air, c'est-à-dire l'espace qu'il parcourt en une seconde. La dernière fut faite dans l'été de 1822, pendant la nuit, par les membres du Bureau des longitudes. On avait choisi pour stations deux hauteurs situées l'une à Villejuif, l'autre à Montlhéry, près Paris. A chaque station on tirait, de 10 en 10 minutes, un coup de canon. Les observateurs de Villejuif entendirent très-distinctement les 12 coups tirés à Montlhéry; mais ceux de cette station n'entendirent que 7 coups, sur 12 tirés à Villejuif, la direction du vent étant contraire.

A chaque station, les observateurs notaient, au moyen de chronomètres, le temps qui s'écoulait entre l'apparition de la lumière, au moment de l'explosion, et l'audition du son. Ce temps pouvait être pris pour celui qu'employait le son à se propager d'une station à l'autre, car l'intervalle des deux stations n'était que de 18612^{m},52, et on verra, en optique, que, pour parcourir cette distance, il faut à la lumière un temps inappréciable. On trouva ainsi que la durée moyenne de la propagation du son d'une station à l'autre était de 54^{s},6. Divisant par ce nombre l'intervalle des deux stations, on trouve que la vitesse du son, par seconde, est de 340^{m},89, à la température de 16 degrés, qui était celle de l'atmosphère pendant l'expérience.

La vitesse du son dans l'air décroît avec la température : à 10 degrés, elle n'est que de 337 mètres; à zéro, de 333 mètres. Mais, pour une même température, elle est indépendante de la densité de l'air et, par conséquent, de la pression. A température égale, elle est la même pour tous les sons, forts ou faibles, graves ou aigus. En effet, M. Biot constata, dans les expériences ci-dessus mentionnées sur la conductibilité des tuyaux, que lorsqu'on jouait de la flûte à l'extrémité d'un tuyau de fonte de 951 mètres de longueur, les sons gardaient leur rhythme à l'autre extrémité; ce qui indique que les différents sons se propagent avec des vitesses égales.

La vitesse du son varie d'un gaz à un autre, quoique la température soit la même. En faisant résonner un même tuyau d'orgue avec différents gaz, Dulong a trouvé, par le calcul, qu'à la température zéro la vitesse du son, dans les gaz, est :

Acide carbonique.....	116m
Oxygène.....	317
Air.....	333
Oxyde de carbone....	337
Hydrogène.....	1269

* 193. **Formules pour calculer la vitesse du son dans les gaz.** — Newton, le premier, a donné, pour calculer dans les gaz la vitesse du son, à la température zéro, la formule

$$v = \sqrt{\frac{e}{d}};$$

dans laquelle v représente la vitesse du son, c'est-à-dire l'espace qu'il parcourt en une seconde, e l'élasticité du gaz à zéro et d sa densité aussi à zéro.

On conclut de cette formule que la vitesse de propagation du son, dans les gaz, *est directement proportionnelle à la racine carrée de l'élasticité du gaz que l'on considère et inversement proportionnelle à la racine carrée de sa densité.* On voit, en même temps, que cette vitesse reste constante quelle que soit la pression, car l'élasticité augmentant, la densité augmente dans le même rapport, d'après la loi de Mariotte.

En représentant par g l'intensité de la pesanteur, par h la hauteur du baromètre ramenée à zéro, et par δ la densité du mercure aussi à zéro, il est évident que, pour un gaz soumis à la pression atmosphérique, l'élasticité e croissant comme chacune de ces quantités, on peut poser $e = gh\delta$. La formule de Newton devient donc, pour la température zéro, $v = \sqrt{\frac{gh\delta}{d}}$.

Or, la température d'un gaz augmentant de 0 à t degrés, sa densité varie en raison inverse du volume ; par conséquent, si l'on représente par 1 le volume du gaz à zéro, son volume à t degrés sera $1 + \alpha t$, α étant le coefficient de dilatation du gaz (CALORIQUE, chap. IV) ;

et sa densité, qui est d à zéro, sera $\frac{d}{1 + \alpha t}$ à t degrés. La formule de Newton, pour une température t, doit donc s'écrire $v = \sqrt{\frac{gh\delta}{d}(1 + \alpha t)}$.

Les valeurs de v obtenues par cette formule ont toujours été plus petites que celles fournies par l'expérience. Laplace a donné, pour cause de cette différence, la chaleur qui se développe, par l'effet de la pression, dans les ondes condensées. En s'appuyant sur les idées de Laplace, Poisson et M. Biot ont trouvé que la formule de Newton doit être ramenée à la forme $v = \sqrt{\frac{gh\delta}{d}(1 + \alpha t)\frac{c}{c'}}$;

c étant le calorique spécifique, à pression constante, du gaz dans lequel le son se propage (CALORIQUE, chap. VIII), et c' son calorique spécifique à volume constant. Ainsi modifiée, cette formule donne des valeurs de v d'accord avec l'expérience.

194. **Vitesse du son dans les liquides et les solides.** — La vitesse du son, dans les liquides, est beaucoup plus grande que dans l'air. Colladon et Sturm ont trouvé, par des expériences faites, en 1827, sur le lac de Genève, que la vitesse du son, dans l'eau, est de 1435 mètres. C'est plus que le quadruple de celle qui a lieu dans l'air.

Dans les solides, la vitesse du son est encore plus grande. En expérimentant sur des tuyaux de fonte destinés à la conduite des eaux, M. Biot a trouvé directement que, dans la fonte, le son se propage 10,5 fois plus vite que dans l'air. La vitesse du son dans les autres solides a été déterminée théoriquement par Chladni, Savart, M. Masson et M. Wertheim, en s'appuyant, soit sur le nombre des vibrations longitudinales ou transversales des corps, soit sur leur coefficient d'élasticité. Chladni a trouvé, à l'aide des vibrations longitudinales, que, dans les bois, la vitesse du son est de 10 à 16 fois plus grande que dans l'air. Dans les métaux, cette vitesse est plus variable, et égale de 4 à 16 fois celle qui a lieu dans l'air.

195. **Réflexion du son.** — Tant que les ondes sonores ne sont point gênées dans leur développement, elles se propagent sous forme de sphères concentriques; mais lorsqu'elles rencontrent un obstacle, elles suivent la loi générale des corps élastiques, c'est-à-dire qu'elles reviennent sur elles-mêmes, en formant de nouvelles ondes concentriques qui semblent émaner d'un second centre situé de l'autre côté de l'obstacle; ce qu'on exprime en disant que les ondes sont *réfléchies*.

La figure 123 représente une suite d'ondes incidentes, réfléchies sur un obstacle PQ. Si l'on considère, par exemple, l'onde incidente MCDN, émise du centre A, l'onde réfléchie correspondante est représentée par l'arc CKD, dont le point a est le *centre virtuel*.

Si l'on joint un point quelconque C du corps réfléchissant au centre sonore A, et qu'on mène la perpendiculaire CH à la surface de ce corps, l'angle ACH se nomme *angle d'incidence*, et l'angle BCH, formé par le prolongement de *a*C, est l'*angle de réflexion*.

Cela posé, la réflexion du son est soumise aux deux lois suivantes, qui sont les mêmes pour la chaleur et la lumière :

1° *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.*

2° *Le rayon sonore incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante.*

D'après cette loi, l'onde, qui, dans la figure, se propage suivant AC, prend, après la réflexion, la direction CB; en sorte qu'un

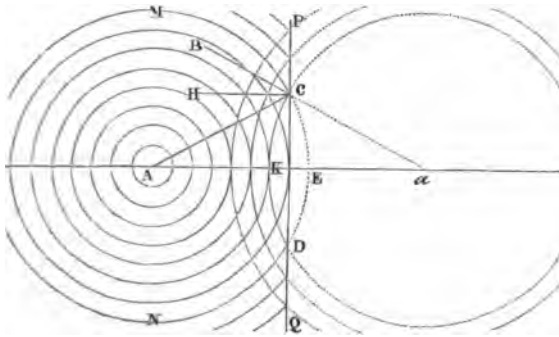


Fig. 123.

observateur placé en B entend, outre le son parti du point A, un deuxième son qui lui semble émis dans la direction CB.

* 196. **Réfraction du son.** — On verra plus tard (426) qu'on entend par *réfraction* un changement de direction qu'éprouvent la lumière et le calorique en passant d'un milieu dans un autre. Or, M. Sondhauss, en Allemagne, a constaté récemment que les ondes sonores se réfractent comme la chaleur et la lumière.

A cet effet, il a construit des lentilles gazeuses, en remplissant d'acide carbonique des enveloppes membraneuses de forme sphérique ou lenticulaire. Avec des enveloppes de papier ou de baudruche, la réfraction du son n'est pas sensible, mais avec une enveloppe de *collodion* l'expérience réussit très-bien.

M. Sondhauss coupe, sur un très-grand ballon de collodion, deux segments égaux, et les fixe sur les deux faces d'un anneau de tôle ayant 31 centimètres de diamètre, de manière à former une lentille

biconvexe, creuse, dont l'épaisseur, au centre, est d'environ 12 centimètres. Puis, remplissant d'acide carbonique la lentille ainsi formée, il place une montre ordinaire sur la direction de l'axe, et cherche ensuite, de l'autre côté de la lentille, le point où le bruit de la montre est entendu avec plus d'intensité. On observe ainsi que tant que l'oreille est éloignée de l'axe, le son est à peine perceptible, mais que lorsqu'elle est sur l'axe, à une distance convenable de la lentille, le son est entendu très-distinctement; les ondes sonores, à leur sortie de la lentille, viennent donc concourir vers l'axe, ce qui montre qu'elles ont changé de direction, et, par conséquent, qu'elles sont réfractées.

197. **Échos et résonnances.** — On nomme *écho* la répétition d'un son, dans l'air, par l'effet de sa réflexion sur quelque obstacle.

Pour un son très-bref, comme un choc, il peut y avoir écho, lorsque la surface réfléchissante est distante seulement de 17 mètres. Mais pour les sons articulés, il faut au moins une distance double; c'est-à-dire 34 mètres. En effet, il est facile de constater qu'on ne peut prononcer distinctement plus de cinq syllabes par seconde. Or, la vitesse du son étant de 340 mètres par seconde, il s'ensuit que dans un cinquième de seconde le son parcourt 68 mètres. Par conséquent, si l'obstacle réfléchissant est au moins à une distance de 34 mètres, le son, tant pour aller jusqu'à l'obstacle que pour revenir, aura au moins 68 mètres à parcourir. Le temps écoulé entre le son articulé et le son réfléchi sera donc au moins d'un cinquième de seconde; dès lors les deux sons ne se confondront pas, et le son réfléchi sera entendu distinctement. D'après ce qui précède, si l'on parle à voix haute devant un réflecteur distant de 34 mètres, on ne peut distinguer que la dernière syllabe réfléchie; l'écho est donc *monosyllabique*. Si le réflecteur est distant de deux fois, trois fois 34 mètres, l'écho sera *dissyllabique*, *trissyllabique*, et ainsi de suite.

Lorsque la distance de la surface réfléchissante est moindre que 34 mètres, le son direct et le son réfléchi tendent à se confondre. On ne peut donc les entendre séparément; mais le son se trouve renforcé, ce qu'on exprime en disant qu'il y a *résonnance*. C'est ce qu'on observe dans les grands appartements. Les salles nues sont très-retentissantes; au contraire, les tentures, les draperies, qui réfléchissent mal le son, rendent les appartements *sourds*.

On nomme *échos multiples* ceux qui répètent plusieurs fois le même son : c'est ce qui arrive lorsque deux obstacles placés l'un vis-à-vis de l'autre, deux murs parallèles, par exemple, se ren-

voient successivement le son. Il existe des échos qui répètent ainsi jusqu'à 20 ou 30 fois le même son. On cite particulièrement celui du château de Simonetta, en Italie.

Les lois de la réflexion du son étant les mêmes que celles de la réflexion de la lumière et de la chaleur, les surfaces courbes donnent naissance à des *foyers acoustiques* analogues aux foyers lumineux et calorifiques qui se produisent devant les réflecteurs concaves (347). Par exemple, si l'on parle sous une arche de pont en pierre, la face tournée contre l'une des piles, la voix peut se reproduire auprès de l'autre pile avec assez d'intensité pour qu'on entretienne ainsi une conversation à voix basse, sans que des personnes placées dans l'espace intermédiaire puissent l'entendre.

Il existe, au rez-de-chaussée du Conservatoire des arts et métiers de Paris, une salle carrée, à voûte elliptique, qui présente ce phénomène d'une manière remarquable, lorsqu'on se place aux deux foyers de l'ellipse.

Du reste, il est à remarquer que le son ne se réfléchit pas seulement à la surface des corps solides, comme les murs d'un édifice, les bois, les rochers; il se réfléchit aussi sur les nuages, à la rencontre d'une couche d'air de densité différente de celle qu'il vient de traverser, enfin sur les vésicules mêmes des brouillards. On observe, en effet, que si l'air est brumeux, les sons subissent une foule de réflexions partielles, et s'éteignent rapidement. C'est la nuit, lorsque l'air est pur, calme et d'une densité uniforme, que les sons peuvent être entendus de plus loin.

* 198. **Porte-voix, cornet acoustique.** — Le *porte-voix* et le *cornet acoustique* sont deux instruments fondés à la fois sur la réflexion du son et sur la conductibilité des tuyaux cylindriques (191).

Le porte-voix, ainsi que l'indique son nom, est destiné à transmettre la voix à de grandes distances. C'est un tube de fer-blanc ou de laiton (fig. 124), légèrement conique et très-évasé à l'une de

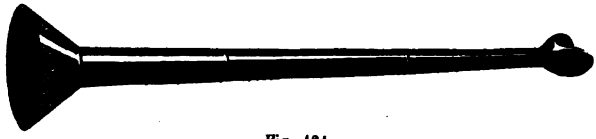


Fig. 124.

ses ouvertures qu'on nomme *pavillon*. Cet instrument, qui s'embouche par l'autre extrémité, porte la voix d'autant plus loin que ses dimensions sont plus grandes. On explique, en général, les

effets du porte-voix par une suite de réflexions successives des ondes sonores sur les parois du tube, réflexions en vertu desquelles les ondes tendraient à se propager de plus en plus suivant une direction parallèle à l'axe de l'instrument. On a objecté à cette théorie que les sons émis à travers le porte-voix ne sont pas renforcés seulement dans la direction de son axe, mais dans toutes les directions; et encore que le pavillon serait inutile pour obtenir le parallélisme des rayons sonores, tandis qu'au contraire il exerce une influence considérable sur l'intensité des sons transmis. Quelques physiciens attribuent les effets du porte-voix à un renforcement produit par la colonne d'air qui est dans le tube, laquelle vibre à l'unisson, à mesure qu'on parle à son extrémité. Quant à l'effet du pavillon, on n'en a point donné jusqu'ici d'explication satisfaisante.

Le cornet acoustique sert aux personnes qui ont l'*oreille dure*. C'est un tube conique, en métal, dont l'une des extrémités, terminée en pavillon, est destinée à recevoir le son, tandis que l'autre extrémité est introduite dans l'oreille. Le pavillon sert ici d'embouchure, c'est-à-dire qu'il reçoit les sons venant de la bouche de la personne qui parle. Ces sons se transmettent par une suite de réflexions dans l'intérieur du cornet, en sorte que des ondes qui eussent pris un grand développement se trouvent concentrées dans l'appareil auditif, et y produisent un effet beaucoup plus sensible que ne l'eussent fait des ondes divergentes.

CHAPITRE II

VIBRATIONS DES CORDES, NOMBRE DE VIBRATIONS CORRESPONDANT A UN SON DONNÉ.

199. **Vibrations des cordes.** — On nomme *cordes*, en acoustique, des corps filiformes élastiques par tension.

On distingue, dans les cordes, deux sortes de vibrations, les unes *transversales*, ou dans une direction perpendiculaire aux cordes; les autres *longitudinales*, ou dans le sens de la longueur. On excite les premières avec un archet, comme sur le violon, ou en pinçant les cordes, comme on le fait sur la harpe et la guitare. Quant aux vibrations longitudinales, on les fait naître en frottant les cordes, dans le sens de leur longueur, avec un morceau d'étoffe saupoudré de colophane.

Nous ne traiterons que des vibrations transversales, les seules nécessaires pour la théorie physique de la musique.

200. **Sonomètre.** — Le *sonomètre* est un appareil qui sert à étudier les vibrations transversales des cordes. On l'appelle aussi *monocorde*, parce que souvent il ne porte qu'une seule corde. Cet appareil se compose d'une caisse de bois mince, destinée à renforcer le son; sur cette caisse sont deux chevalets fixes A et D (fig. 125), sur lesquels passe une corde métallique, fixée par un bout et tendue à l'autre par des poids P, qu'on augmente à volonté. Un troisième

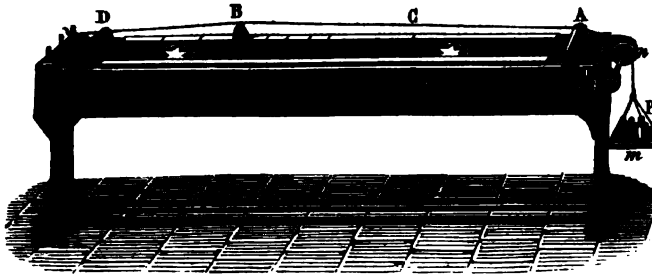


Fig. 125 ($l = 1^m,34$).

chevalet B se déplace sur la caisse, afin de faire varier, à volonté, la longueur de la partie de la corde qu'on veut mettre en vibration.

201. **Lois des vibrations transversales des cordes.** — En représentant par l la *longueur* d'une corde, c'est-à-dire la partie vibrante comprise entre les deux chevalets A et B (fig. 125), par r le rayon de sa section, par d sa densité, par P le poids qui la tend, et par n le nombre de vibrations par seconde, on trouve, par le calcul, $n = \frac{1}{rl}\sqrt{\frac{P}{\pi d}}$; π étant le rapport de la circonférence au diamètre.

On déduit de cette formule les quatre lois suivantes :

1° *La tension d'une corde étant constante, le nombre des vibrations, dans le même temps, est en raison inverse de la longueur.*

2° *Toutes choses égales d'ailleurs, le nombre des vibrations est en raison inverse du rayon de la corde.*

3° *Le nombre des vibrations d'une même corde est directement proportionnel à la racine carrée du poids qui la tend.*

4° *Toutes choses égales d'ailleurs, le nombre des vibrations*

d'une corde est inversement proportionnel à la racine carrée de sa densité.

En musique, ces lois trouvent leur application dans les instruments à corde, dans lesquels on fait varier la longueur, le diamètre et la tension des cordes, de manière à leur faire rendre telle ou telle note.

202. **Nœuds et lignes nodales.** — Lorsqu'un corps vibre, non-seulement il vibre dans son ensemble, mais il se divise généralement en un certain nombre de parties aliquotes, dont chacune est animée de vibrations qui lui sont propres.

Entre ces diverses parties, il existe des points ou des lignes qui vibrent moins que les autres, et qu'on peut regarder comme sen-

Fig. 126.

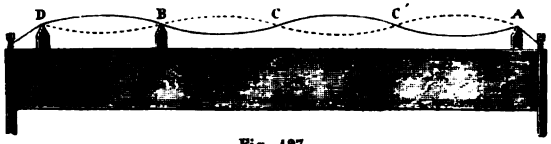


Fig. 127.

siblement fixes. Ce sont ces points et ces lignes qu'on désigne sous les noms de *nœuds* et de *lignes nodales*. Les parties vibrantes comprises entre deux nœuds ou deux lignes nodales se nomment *concamérations*. Le milieu d'une concamération, là où les vibrations atteignent leur maximum d'amplitude, est un *ventre*.

Les cordes vibrantes présentent des exemples curieux de nœuds et de ventres, quand on ne fait vibrer qu'une partie aliquote de leur longueur, c'est-à-dire un tiers, un quart, un cinquième. Pour cela, on fixe la corde à ses deux bouts, et on fait glisser dessous un petit chevalet, en l'arrêtant successivement au tiers, au quart, au cinquième de la corde. Le chevalet étant au tiers, comme le représente la figure 126, on fait vibrer la portion BD avec un archet; l'autre portion AB se subdivise alors en deux parties AC et CB, qui vibrent séparément, le point C demeurant fixe. Cela se constate en plaçant de petits chevrons de papier, l'un en C, un autre entre B

et C, un troisième entre C et A. Celui qui est en C n'éprouve qu'un léger ébranlement, tandis que les deux autres sont projetés au loin. Il y a donc un nœud dans le premier point, et des ventres dans les deux autres. Si le chevalet B est au quart de la corde, il se produit, entre A et B, deux nœuds et trois ventres (fig. 127); s'il est au cinquième, il se forme, entre les mêmes points, trois nœuds et quatre ventres, et ainsi de suite.

On verra bientôt (222) comment on constate l'existence et la forme des lignes nodales dans les plaques et les membranes.

* 203. **Roue dentée de Savart.** — La *roue dentée de Savart*, ainsi nommée du nom de son inventeur, est un appareil destiné à

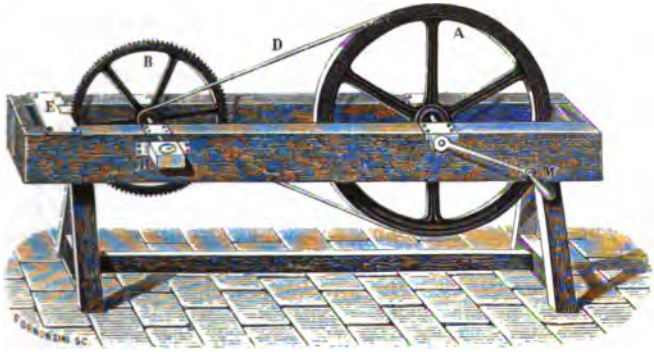


Fig. 128 ($h = 1^m,05$).

faire connaître le nombre absolu de vibrations qui correspond à un son déterminé. Il est formé d'un banc de chêne, solidement établi et ouvert dans toute sa longueur. Dans l'ouverture sont montées deux roues A et B (fig. 128) : la première sert à imprimer une grande vitesse à la plus petite, et cette dernière, qui est garnie de dents, est destinée à faire vibrer une carte E fixée sur le banc. Cette carte, étant choquée au passage de chaque dent, fait, par révolution de la petite roue, autant de vibrations complètes qu'il y a de dents. Enfin, sur le côté de l'appareil, est un compteur H qui reçoit son mouvement de l'axe de la roue dentée, et qui indique le nombre de tours, et, par suite, le nombre de vibrations, dans un temps donné.

Si l'on imprime d'abord à la roue dentée un mouvement lent, on entend distinctement les chocs successifs des dents contre la

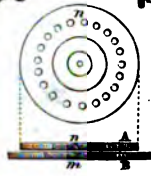
carte; mais si l'on augmente graduellement la vitesse, on obtient un son continu de plus en plus élevé. Lorsqu'on est ainsi parvenu à reproduire le son dont on veut connaître le nombre de vibrations, on entretient la même vitesse pendant un certain nombre de secondes déterminé; en lisant ensuite, sur le compteur, le nombre de tours de la roue dentée B, il ne reste plus qu'à multiplier ce nombre par celui des dents, pour obtenir le nombre total des vibrations. Divisant enfin ce produit par le nombre de secondes correspondant, le quotient donne le nombre de vibrations par seconde.

204. Sirène. — La *sirène* est un petit appareil qui sert, comme la roue de Savart, à mesurer le nombre précis des vibrations d'un corps sonore en un temps donné. M. Cagniard-Latour, qui en est l'inventeur, a donné le nom de sirène à cet instrument, parce qu'on peut lui faire rendre des sons sous l'eau.

La sirène est entièrement en cuivre. La figure 129 la représente montée sur la caisse d'une soufflerie qui est décrite ci-après (fig. 132), et dont la fonction est d'envoyer un courant d'air continu dans la sirène. Les figures 130 et 131 montrent les détails intérieurs de celle-ci. La partie inférieure consiste en une boîte cylindrique O, recouverte d'un plateau fixe B. Sur ce plateau s'appuie une tige verticale T, à laquelle est fixé un disque A, qui peut tourner librement avec la tige; des trous circulaires équidistants sont pratiqués dans le plateau B, et dans le disque A se trouve un nombre égal de trous de même grandeur et à la même distance du centre que ceux du plateau. Ces trous ne sont point perpendiculaires aux plans du plateau et du disque; mais, tous inclinés de la même quantité dans le plateau, ils le sont en sens contraire dans le disque, de manière que, lorsque les trous du plateau et ceux du disque sont en regard, ils sont disposés comme on le voit en *mn* (fig. 131). Il résulte de cette disposition que lorsqu'un courant d'air rapide arrive de la soufflerie dans la boîte cylindrique et dans le trou *m*, il frappe obliquement les parois du trou *n*, et imprime au disque A un mouvement de rotation dans le sens *n*A.

Pour simplifier l'explication du jeu de la sirène, supposons d'abord que le disque mobile A portant 18 trous, le plateau fixe B ne soit percé que d'un seul trou, et considérons le cas où celui-ci coïncide avec un des trous supérieurs. Le vent de la soufflerie venant à frapper obliquement la paroi de ce dernier, le disque mobile se met à tourner, et le plein qui se trouve entre deux trous consécutifs vient fermer le trou du plateau inférieur. Mais le disque continuant à tourner, en vertu de sa vitesse acquise, deux trous se trouvent

de nouveau en regard, d'où résulte une nouvelle impulsion, et ainsi de suite. De la sorte, pendant une révolution complète du disque, l'orifice inférieur est 18 fois ouvert et 18 fois fermé. Il en résulte une suite d'écoulements et d'arrêts qui font entrer l'air en vibration, et finissent ainsi par produire un son, quand les impulsions successives sont assez rapides. Si l'on suppose actuellement que le



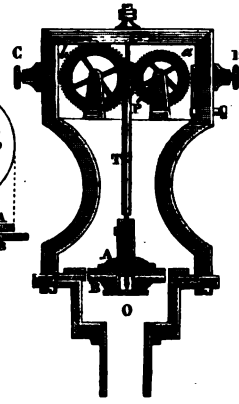


Fig. 129 (h = 17). Fig. 131. Fig. 130.

plateau fixe B ait 18 trous, comme le disque tournant, chaque trou produira simultanément le même effet qu'un seul ; le son sera donc 18 fois plus intense, mais le nombre des vibrations n'en sera pas augmenté.

Pour connaître le nombre de vibrations correspondant au son que rend l'appareil pendant son mouvement de rotation, il reste à savoir combien le disque A fait de révolutions par seconde. Pour cela, la tige T porte une vis sans fin, qui transmet le mouvement à une roue *a* de 100 dents. Cette roue, qui avance d'une dent pour chaque révolution du disque, porte un taquet P qui, à chaque tour, fait marcher d'une dent une seconde roue *b* qu'on voit à gauche dans la figure 130. Les axes de ces roues font tourner deux aiguilles qui se meuvent sur des cadrans représentés dans la figure 129. Ces aiguilles indiquent, l'une le nombre des tours du disque A, l'autre les centaines de tours. Deux boutons D et C servent à engrener ou à désengrener, à volonté, la petite roue *a* avec la vis sans fin.

Comme le son s'élève à mesure que la vitesse du disque A s'accroît, il suffit de forcer le vent pour parvenir à faire rendre à l'appareil un son déterminé. On entretient alors le même courant d'air pendant un certain temps, deux minutes, par exemple, puis on lit, sur le cadran, le nombre de tours qu'a faits le disque. En multipliant ce nombre par 18 et divisant le produit par le nombre de secondes 120, le quotient indique le nombre de vibrations par seconde.

La sirène, à vitesse égale, donne le même son dans l'eau que dans l'air; il en est de même dans tous les gaz, ce qui fait voir qu'un son déterminé ne dépend que du nombre des vibrations, et non de la nature du corps sonore.

205. **Soufflerie.** — On nomme *soufflerie*, en acoustique, un soufflet à réservoir d'air qui sert à faire marcher les instruments à vent, tels que la sirène et les tuyaux d'orgue. Entre les quatre pieds d'une table de bois est un soufflet S (fig. 132), qu'on fait marcher à l'aide d'une pédale P. Un réservoir D, en peau flexible, sert à emmagasiner l'air qui y est refoulé par le soufflet. Si l'on comprime ce réservoir par des poids placés dessus, ou au moyen d'une tige T qu'on fait mouvoir à la main, l'air est chassé par un conduit E dans une caisse C fixée sur la table. Cette caisse est percée de trous fermés par de petites soupapes de cuir, qu'on ouvre à volonté, en appuyant sur des touches placées au-devant de la caisse. C'est donc dans ces trous qu'on place une sirène *m* ou des tuyaux sonores.

206. **Limite des sons perceptibles.** — Avant les travaux de Savart, les physiciens admettaient que l'ouïe cessait de percevoir le son lorsque le nombre des vibrations simples, par seconde, était au-dessous de 32 pour les sons graves, et au-dessus de 18000 pour les sons aigus. Mais ce savant a fait voir que ces limites étaient beaucoup trop resserrées, et que la faculté de percevoir plus ou moins facilement des sons très-graves ou très-aigus dépend plutôt de l'intensité que de la hauteur; en sorte que quand les sons extrêmes ne sont pas entendus, cela tient à ce que ces sons n'ont pas été produits avec une intensité assez forte pour impressionner l'organe de l'ouïe.

En augmentant le diamètre de sa roue dentée (203), et, par suite, l'amplitude et l'intensité des vibrations, Savart a reculé la limite des sons aigus jusqu'à 48000 vibrations simples par seconde.

Pour les sons graves, il a substitué à sa roue dentée une barre

de fer de 65 centimètres de longueur, tournant entre deux lames minces de bois, distantes de la barre de 2 millimètres seulement. A chaque passage, il se produit un son sec, dû au déplacement de l'air. Le mouvement s'accélérant, le son devient continu, extrême-

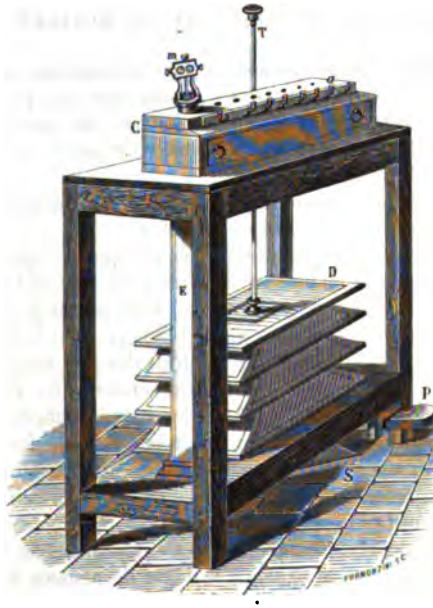


Fig. 132. ($h = 1^m,30$).

ment plein et assourdissant. Savart a trouvé, à l'aide de cet appareil, que lorsqu'il se produit de 14 à 16 vibrations simples par seconde, l'oreille perçoit encore un son bien déterminé, mais extrêmement grave.

M. Desprets, qui a fait des recherches sur le même sujet, trouve 32 vibrations simples pour limite des sons graves, et 73700 pour limite des sons aigus.

CHAPITRE III

THÉORIE PHYSIQUE DE LA MUSIQUE.

207. Qualité du son musical. — Le *son musical* est le résultat de vibrations continues, rapides et isochrones, qui produisent sur l'organe de l'ouïe une sensation prolongée. On peut toujours le comparer à d'autres sons et en prendre l'unisson, ce qui ne peut se faire pour le bruit (184).

L'oreille distingue dans le son musical trois qualités particulières : la hauteur, l'intensité et le timbre.

La *hauteur* est l'impression qui résulte, pour l'organe de l'ouïe, du plus ou moins grand nombre de vibrations dans un temps donné.

On nomme *sons graves* ceux qui sont produits par un petit nombre de vibrations, et *sons aigus* ceux qui sont le résultat d'un grand nombre de vibrations. Il n'y aurait donc de sons absolument graves ou aigus que ceux qui se trouveraient aux extrémités de l'échelle des sons perceptibles. Tous les sons intermédiaires ne sont graves ou aigus que d'une manière relative. Toutefois, on dit un son grave ou un son aigu, comme on dit une basse température ou une température élevée, en comparant le son à ceux qu'on entend le plus ordinairement.

Le rapport de gravité ou d'acuité de deux sons se nomme *ton*. C'est-à-dire que ce mot exprime le degré de hauteur d'un son ; au point de vue musical, il exprime le degré de hauteur de la gamme dans laquelle on joue.

On a déjà vu (189) que l'*intensité* ou la force du son dépend de l'amplitude des oscillations et non de leur nombre. Un même son peut conserver le même degré de gravité ou d'acuité, et prendre une intensité plus ou moins grande, lorsqu'on fait varier l'amplitude des oscillations qui le produisent. C'est ce qui arrive pour une corde tendue, suivant qu'on l'écarte plus ou moins de sa position d'équilibre.

Le *timbre* est ce qui fait que deux instruments différents rendant chacun un son de même hauteur et de même intensité, ces deux sons peuvent être parfaitement distingués l'un de l'autre. Le son du hautbois, par exemple, est très-distinct de celui de la flûte ; le son du cor, de celui du basson. De même, la voix humaine présente

un timbre bien différent, suivant les individus, l'âge ou le sexe.

La cause du timbre n'est pas bien connue. Cette qualité paraît dépendre non-seulement de la matière des instruments, mais aussi de leur forme et du mode d'ébranlement : on change complétement le son d'une trompette de laiton écroui si on la recuit dans un four. On observe aussi que la trompette droite a le son plus éclatant que la trompette courbe.

208. Unisson. — Deux sons produits par un même nombre de vibrations par seconde sont dits *à l'unisson :* ils sont alors également graves ou aigus. Par exemple, la roue de Savart et la sirène sont à l'unisson quand leurs compteurs indiquent un même nombre de vibrations dans le même temps.

On peut toujours prendre l'unisson d'un son musical; mais on ne peut prendre celui d'un bruit. C'est en mettant la sirène à l'unisson d'un corps sonore que l'on constate le nombre des vibrations de celui-ci.

209. Échelle musicale, gamme. — On nomme *échelle musicale* une série de sons séparés les uns des autres par des intervalles qui paraissent avoir leur origine dans la nature de notre organisation.

Dans cette série, les sons se reproduisant, dans le même ordre, par période de sept, chaque période se désigne sous le nom de *gamme*, et les sept sons ou *notes* de chaque gamme, par les noms *ut*, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*.

On peut représenter par des nombres les notes de la gamme. Pour cela, on prend pour l'*ut* le *son fondamental* du sonomètre (200), c'est-à-dire celui qu'il rend lorsque la corde vibre dans toute sa longueur. En faisant varier ensuite la position du chevalet mobile B (fig. 125), un observateur, dont l'oreille est exercée, trouve facilement la longueur qu'il faut successivement donner à la partie vivante AB, pour obtenir les six autres notes. Or, en représentant par 1 la longueur de la corde donnant l'*ut*, on trouve que les longueurs des cordes qui donnent les autres notes sont représentées par les fractions suivantes :

(A)	Notes.....	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*
	Longueurs relatives des cordes.....	1	$\frac{8}{9}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{8}{15}$

La corde qui donne le *ré* n'est donc que les $\frac{8}{9}$ de celle qui donne l'*ut :* celle qui fait entendre le *mi* n'est que les $\frac{4}{5}$ de la même corde, et ainsi de suite. Tels sont les nombres qui servent à représenter

les notes de la gamme d'après la longueur relative des cordes qui les donnent.

En continuant à déplacer le chevalet sur le sonomètre, on trouve que le huitième son est produit par la moitié de la corde qui rendait le son fondamental. La suite des mêmes rapports que ci-dessus recommence à partir de ce son, et on obtient une nouvelle gamme entièrement comparable à la première, la longueur de corde correspondant à chaque note de cette seconde gamme étant la moitié de la corde qui correspond à la note de même nom dans la gamme précédente ; et ainsi de suite pour une troisième, une quatrième gamme.

Pour avoir le nombre relatif de vibrations correspondant à chaque note, dans le même temps, il suffit de renverser les fractions du tableau précédent ; car d'après la première loi des vibrations des cordes (201), le nombre des vibrations d'une corde est en raison inverse de sa longueur. En représentant donc par 1 le nombre de vibrations qui donne le son fondamental pris pour *ut*, on forme le tableau suivant :

(B)	Notes.....	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*
	Nombres relatifs de vibrations.....	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$

La gamme dont les rapports de vibrations viennent d'être indiqués se nomme gamme *diatonique;* on appelle gamme *chromatique* une gamme qui procède par demi-tons, et qui se compose de 13 sons.

210. Nombre absolu de vibrations pour chaque note. — La sirène donne un moyen simple de déduire du tableau ci-dessus le nombre réel de vibrations qui produit chacune des notes de l'échelle musicale. En effet, si on la met à l'unisson de l'*ut* fondamental, elle en fait connaître le nombre précis de vibrations. Il ne reste donc plus qu'à multiplier ce nombre par les rapports $\frac{9}{8}$ $\frac{5}{4}$... du tableau précédent, pour avoir le nombre de vibrations des autres notes.

Or, le son fondamental qu'on a pris pour l'*ut* variant avec la longueur de la corde du sonomètre, avec sa tension et avec sa nature, il en est de même du nombre de vibrations correspondant à l'*ut*. Les nombres réels de vibrations calculés comme on vient de le dire, pourraient donc être représentés par une infinité de nombres, auxquels correspondraient autant de gammes différentes.

Parmi toutes les gammes qu'on peut ainsi se représenter, on a choisi celle dont l'*ut* correspond au son le plus grave de la basse, et on est convenu, en physique, de distinguer les notes de cette

gamme en leur donnant l'indice $_1$; tandis qu'on donne aux notes des gammes plus élevées les indices $_2$, $_3$...., et, aux notes des gammes plus graves, les indices $-_1$, $-_2$,... c'est-à-dire qu'on écrit *ut* $_1$, *ré* $_1$, *ut*$-_1$, *ré*$-_1$.....

Cela posé, l'expérience ayant appris que le nombre de vibrations correspondant au son le plus grave de la basse est 128, il suffit de multiplier ce nombre par les rapports inscrits dans le tableau B (209), pour obtenir le nombre de vibrations absolu de chaque note, ce qui donne le tableau suivant :

(C)							
Notes.....	*ut* $_1$	*ré* $_1$	*mi* $_1$	*fa* $_1$	*sol* $_1$	*la* $_1$	*si* $_1$
Nombres absolus de vibrations simples...	128	144	160	170	192	214	240

Les nombres absolus de vibrations, pour les gammes supérieures, s'obtiennent en multipliant successivement par 2, par 4, par 8... les nombres du tableau C; et pour les gammes inférieures, on divise ces mêmes nombres par 2, par 4.... Par exemple, le nombre de vibrations simples de *sol* $_3$ est égal à 192 × 4 ou 768 par seconde.

211. **Longueur des ondes.** — Lorsqu'on connaît le nombre de vibrations simples que fait un corps sonore par seconde, il est facile d'en déduire la longueur des ondes. On sait, en effet, que le son parcourt 337 mètres ou environ 1024 pieds par seconde. Si donc un corps ne faisait qu'une vibration simple par seconde, la longueur de l'onde serait de 1024 pieds; s'il en faisait deux, la longueur de l'onde serait la moitié de 1024, et ainsi de suite. Or, on a vu qu'à *ut* $_1$ correspondent 128 vibrations simples par seconde; la longueur des ondes est donc le quotient de 1024 pieds divisé par 128, c'est-à-dire huit pieds.

Le tableau suivant indique la longueur d'onde correspondant à la première note des gammes successives.

	Longueur d'ondes en pieds.	Nombre des vibrations.
ut$-_3$	64	16
ut$-_2$	32	32
ut$-_1$	16	64
ut$_1$	8	128
ut$_2$	4	256
ut$_3$	2	512
ut$_4$	1	1024

212. Intervalles, dièses et bémols. — On nomme *intervalle*, en musique, le rapport d'un son à un autre, c'est-à-dire le nombre qui indique de combien un son est plus élevé qu'un autre. L'intervalle de *ut* à *ré* s'appelle une *seconde;* de *ut* à *mi*, une *tierce;* de *ut* à *fa*, une *quarte;* de *ut* à *sol*, une *quinte;* de *ut* à *la*, une *sixte;* de *ut* à *si*, une *septième*, et de *ut* à *ut* une *octave*. Le tableau suivant donne les intervalles des notes consécutives, obtenus en divisant le nombre des vibrations d'une note quelconque par celui des vibrations de la note immédiatement au-dessous :

(D)	Notes	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut*
	Nombres relatifs des vibrations.	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2
	Intervalles		$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$

On voit que les intervalles différents se réduisent à trois, qui sont $\frac{9}{8}$, $\frac{10}{9}$ et $\frac{16}{15}$. Le premier, qui est le plus grand, s'appelle *ton majeur;* le second, *ton mineur*, et le troisième, qui est le plus petit, se nomme *semi-ton majeur*.

L'intervalle entre le ton majeur et le ton mineur est $\frac{80}{81}$. C'est le plus petit intervalle que l'on considère; il faut une oreille exercée pour l'apprécier. On le désigne sous le nom de *comma*.

Les musiciens ont été conduits à intercaler entre les notes de la gamme des notes intermédiaires qu'on désigne sous les noms de *dièses* et de *bémols*. *Diéser* une note, c'est augmenter le nombre de ses vibrations dans le rapport de 24 à 25; la *bémoliser*, c'est diminuer ce même nombre dans le rapport de 25 à 24. Dans la musique, le dièse est désigné par le signe ♯, et le bémol par le signe ♭.

213. Accord parfait, dissonance. — On nomme *accord*, en général, la coexistence de plusieurs sons produisant sur l'oreille une sensation agréable. Il n'y a accord que lorsque les nombres de vibrations des sons simultanés sont dans un rapport simple; si le rapport est compliqué, l'oreille est désagréablement affectée, et on dit qu'il y a *dissonance*. Le plus simple des accords est l'unisson; viennent ensuite l'octave, la quinte, la tierce, la quarte et la sixte.

On donne le nom d'*accord parfait* à trois sons simultanés, tels que le premier et le second forment une tierce majeure, le second et le troisième une tierce mineure, le premier et le troisième une quinte; c'est-à-dire trois sons tels que les nombres de vibrations qui leur correspondent soient entre eux comme les nombres 4,

5, 6. Exemples : *ut*, *mi*, *sol* ; *sol*, *si*, *ré*, forment deux accords parfaits. Ce sont ces accords qui produisent sur l'oreille la sensation musicale la plus agréable.

214. Battements. — Lorsque deux sons, qui ne sont pas à l'unisson, se produisent simultanément, on entend, à des intervalles égaux, un renforcement du son qu'on nomme *battement*. Par exemple, que le nombre des vibrations, pour ces deux sons, soit 30 et 31 ; après 30 vibrations du premier ou 31 du second, il y aura coïncidence, et, par conséquent, battement. Si les battements sont assez rapprochés pour produire un son continu, ce son sera évidemment plus grave que ceux dont il dérive, puisqu'il provient d'une seule vibration, quand les autres proviennent de 30 et 31.

Fig. 133.

215. Diapason. — Le *diapason* est un petit instrument à l'aide duquel on reproduit, à volonté, une note invariable, ce qui le rend propre à régler les instruments de musique. Il consiste en une verge d'acier recourbée sur elle-même en forme de pincette (fig. 133). On le fait vibrer soit en passant un archet sur ses bords, soit en écartant brusquement ses deux branches au moyen d'un cylindre de fer qu'on passe de force entre elles, comme le montre la figure. Les deux lames, ainsi écartées de leur position d'équilibre, y reviennent en vibrant et produisent un son constant pour chaque diapason. On renforce le son de cet appareil en le fixant sur une caisse de bois blanc, ouverte à l'une de ses extrémités. La note qu'on fait ordinairement rendre au diapason est le *la* $_3$, correspondant à 856 vibrations simples.

CHAPITRE IV

VIBRATION DE L'AIR DANS LES TUYAUX SONORES.

216. Tuyaux sonores. — On nomme *tuyaux sonores* des tubes creux dans lesquels on produit des sons en faisant vibrer la colonne

d'air qui y est renfermée. Ces tubes se désignent encore sous le nom d'*instruments à vent*. Dans les divers appareils décrits jusqu'ici, le son résulte des vibrations des corps solides; l'air n'en est que le véhicule. Dans les instruments à vent, lorsque les tuyaux ont leurs parois suffisamment résistantes, c'est la colonne d'air renfermée dans ces tuyaux qui seule est le corps sonore. On constate, en effet, que la matière des tuyaux est sans influence sur le son; il est le même, à dimensions égales, que les tuyaux soient de bois, de cristal ou de métal. Le timbre seul est modifié.

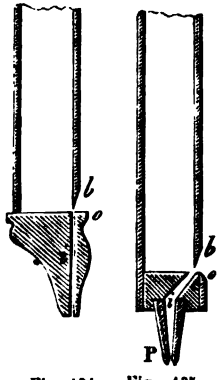


Fig. 134. Fig. 135.

Quant à la manière de mettre l'air en vibration dans les tuyaux, on peut diviser les instruments à vent en instruments à *bouche* et en instruments à *anche*.

217. **Instruments à bouche.** — Dans les instruments à bouche toutes les parties de l'embouchure sont fixes. La figure 135 représente l'embouchure d'un tuyau d'orgue; la figure 134 représente celle du sifflet ou du flageolet. Dans les deux figures, l'ouverture *i* s'appelle la *lumière;* c'est par là que l'air s'introduit dans le tuyau; *bo* est la *bouche*, dont la *lèvre* supérieure *b* est taillée en biseau. A la partie supérieure des deux figures est le tuyau, qui peut être ouvert ou fermé. Dans la figure 135, le *pied* P sert à fixer le tuyau sur une soufflerie (fig. 132).

Lorsqu'un courant d'air rapide arrive par la lumière, il se brise contre la lèvre supérieure, et il en résulte un choc qui fait que l'air ne sort point par la bouche *bo* d'une manière continue, mais par intermittence. De là des pulsations qui, se transmettant à l'air du tuyau, le font vibrer et rendre un son. Pour que le son soit pur, il y a un certain rapport à établir entre les dimensions des lèvres, l'ouverture de la bouche et la grandeur de la lumière. Enfin, le tuyau doit avoir une grande longueur par rapport à son diamètre. Le nombre des vibrations dépend, en général, des dimensions du tuyau et de la vitesse du courant d'air.

Dans la flûte traversière, l'embouchure consiste en une simple ouverture latérale et circulaire. C'est par la disposition qu'on donne

aux lèvres que le courant d'air vient se briser contre les bords de cette ouverture. Il en est de même dans la flûte de Pan et pour une clef forée avec laquelle on siffle.

218. Instruments à anche. — Dans les instruments à anche, c'est une simple languette élastique qui met l'air en vibration; cette languette, qui est de métal ou de bois, est mise en mouvement par un courant d'air. Ces sortes d'anches se trouvent dans le hautbois, le basson, la clarinette, la trompette des enfants, et dans la guimbarde, qui est le plus simple des instruments de cette espèce. Certains tuyaux d'orgue sont à bouche, comme celui décrit ci-dessus (fig. 135); d'autres sont à anche.

Fig. 136.

Fig. 137.

Fig. 138.

La figure 136 représente un de ces derniers avec la disposition qu'on leur donne pour la démonstration dans les cours. Il est monté sur la caisse Q d'une soufflerie, et une glace E, encastrée dans les parois du tuyau, laisse voir les vibrations de l'anche. Un cornet de bois H sert à renforcer le son.

La figure 137 représente l'anche hors de son tuyau. Elle se compose de quatre pièces : 1° un tube rectangulaire de bois, fermé à sa partie inférieure et ouvert à sa partie supérieure en *o*; 2° une plaque de cuivre *cc*, fendue d'une ouverture longitudinale qu'on appelle la *rigole*, laquelle est destinée à donner passage à l'air du tuyau MN jusqu'à l'orifice *o*; 3° une lame élastique *t*, qu'on nomme *languette*, et qui, lorsqu'elle est fixe, rase les bords de la rigole et la ferme à peu près : cette languette est fixe à sa partie supérieure seulement; 4° un fil de fer *r* recourbé à sa partie inférieure par laquelle il presse la languette. Ce fil de fer, qu'on nomme la

rasette, peut s'abaisser plus ou moins pour régler tous les mouvements de la languette, et déterminer la hauteur du son qu'on veut lui faire rendre. La rasette permet d'accorder parfaitement les tuyaux à anche. L'anche étant replacée dans le tuyau MN, lorsqu'un courant d'air arrive dans celui-ci par le pied P, la languette se trouve comprimée, se courbe de dehors en dedans, et livre passage à l'air qui s'échappe par l'orifice *o*. Mais la languette revenant sur elle-même, en vertu de son élasticité, forme une suite d'oscillations qui font que la rigole se trouve successivement ouverte et fermée, et que le courant d'air passe et s'arrête par intermittence; de là résultent des ondes sonores, qui produisent un son dont la hauteur croît avec la vitesse du courant.

Dans l'anche que nous venons de décrire, la languette oscille alternativement en avant et en arrière de la rigole, sans battre ses bords; cette sorte d'anche est une *anche libre*. Mais on construit aussi des *anches battantes*, dans lesquelles, à chaque oscillation, la languette, qui est plus large que la rigole, frappe sur ses bords, ne pouvant ainsi osciller que d'un côté. Cette sorte d'anche est représentée dans la figure 138, qui montre une anche de clarinette; ici il n'y a point de rasette, c'est la pression des lèvres qui en tient lieu. Il en est de même pour les anches du basson et du hautbois.

219. Lois des vibrations de l'air dans les tuyaux fermés par un bout. — Le cas le plus simple des tuyaux sonores est celui des tuyaux fermés par un bout; par exemple, la flûte de Pan, ou quand on souffle dans une clef forée. La colonne d'air peut alors vibrer entière, ou se partager spontanément en parties égales qui vibrent séparément et à l'unisson. Les surfaces de séparation des tranches ainsi formées n'éprouvent que des changements de compression et sont sensiblement immobiles; c'est pourquoi on les nomme des *nœuds de vibration*. Au contraire, les milieux des colonnes d'air comprises entre deux nœuds consécutifs ont toujours la même compression, mais éprouvent les plus grandes oscillations; on les nomme *ventres de vibration*.

Daniel Bernoulli, célèbre géomètre, mort en 1782, a, le premier, fait connaître les lois suivantes sur les sons rendus par les tuyaux sonores :

1° Un tuyau fermé d'un bout et muni d'une anche à l'autre, étant fixé sur la table d'une soufflerie, *il rend des sons de plus en plus élevés à mesure qu'on force le vent, et si l'on représente par* 1 *le son le plus grave, ou le son fondamental, on trouve que le*

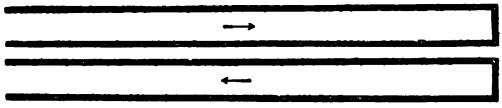
tuyau rend successivement les sons 1, 3, 5, 7, 9..., *représentés par la série des nombres impairs.*

2° *Pour des tuyaux inégaux, les sons de même ordre correspondent à des nombres de vibrations qui sont en raison inverse des longueurs des tuyaux.*

3° *Les vibrations de l'air, dans les tuyaux, sont longitudinales, et la colonne d'air vibrante est partagée en parties égales par des nœuds et des ventres, le fond des tuyaux étant toujours un nœud et l'embouchure un ventre.*

4° *Les nœuds, ou la surface de séparation des parties vi-*

Fig. 139.



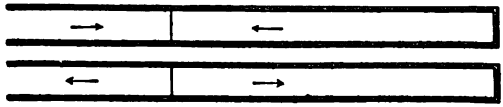


Fig. 140.

brantes, sont immobiles et n'éprouvent que des changements de densité, tandis que les ventres, ou les milieux des parties vibrantes, conservent la même densité, mais sont constamment en vibration.

5° *Dans le cas d'un seul nœud, le tuyau rend le son fondamental, et la longueur de l'onde égale deux fois celle du tuyau.*

Dans le cas d'un seul nœud, celui-ci se trouve toujours au fond du tuyau, et alors à la bouche est un ventre. La figure 139 fait voir, par la direction des flèches, dans quel sens se propagent successivement les ondulations de l'air dans le tuyau, lorsqu'il n'y a qu'un nœud. De même, la figure 140 montre suivant quelle direction l'air marche alternativement, à chaque vibration, quand il y a deux nœuds. Un des nœuds est alors au fond du tuyau, et l'autre au premier tiers à partir de l'extrémité ouverte. La distance des deux nœuds, c'est-à-dire la longueur de l'onde, est donc les deux tiers de la longueur du tuyau. Elle est, par conséquent, trois

fois plus petite que l'onde qui se produit dans le cas d'un seul nœud. Or, dans ce cas, le son était 1 ; il est donc 3 lorsqu'il y a deux nœuds. On verra de même que le nombre des nœuds étant 3, 4, 5, le son est 5, 7, 9 ; résultat conforme à ce qui a été dit ci-dessus.

220. **Lois des vibrations de l'air dans les tuyaux ouverts aux deux bouts.** — Les lois des tuyaux ouverts aux deux bouts ne diffèrent des lois précédentes qu'en ce que *les sons rendus par un même tuyau sont successivement représentés par la suite naturelle des nombres* 1, 2, 3, 4, 5, 6..., et qu'en ce que *les extrémités des tuyaux sont toujours des ventres.*

De plus, *le son fondamental d'un tuyau ouvert par les deux bouts est toujours l'octave aiguë du même son dans un tuyau ouvert par un seul.*

S'il n'y a qu'un nœud, il est au milieu, et chaque moitié du tuyau comprend une demi-onde sonore. S'il y a deux nœuds, ils sont au premier quart à partir de chaque extrémité. S'il y a trois nœuds, ils sont situés au premier, au troisième et au cinquième sixièmes; mais dans tous les cas, il y a toujours un ventre à l'embouchure, et un autre à l'extrémité opposée. C'est sur cette distribution des ventres qu'est fondé l'usage des trous qu'on perce dans les parois des instruments à vent, comme la flûte, la clarinette. En regard d'un ventre le trou est sans effet et ne modifie nullement le son, tandis que vis-à-vis un nœud, il change aussitôt le son en transformant le nœud en ventre, et en faisant varier ainsi la longueur de la colonne d'air vibrante.

Pour constater l'existence des nœuds dans les tuyaux sonores, on y introduit un piston mobile, et on observe, en l'enfonçant à différentes profondeurs, que le son n'éprouve point d'altération toutes les fois que le piston correspond à une surface nodale.

On peut encore vérifier l'existence des nœuds et celle des ventres en faisant résonner un tuyau rectangulaire horizontal dont les parois ont peu d'épaisseur. Ces parois entrent alors en vibration avec la colonne d'air intérieure, et si on les recouvre de sable, on voit celui-ci abandonner les parties où sont les ventres et se porter vers les nœuds.

Les différentes lois que nous venons de faire connaître sur les vibrations de l'air dans les tuyaux sonores sont connues sous le nom de *lois de Bernoulli* ; elles ne se vérifient pas exactement par l'expérience. Que les tuyaux soient à bouche ou à anche, on obtient des sons plus graves que ne l'indique la théorie. Pour que ces lois s'accordassent avec l'expérience, il faudrait des tuyaux dont

la section fût infiniment petite par rapport à la longueur, et l'air devrait être mis directement en vibration sur tout le pourtour du tuyau, et non sur un seul côté, comme on le fait habituellement.

---

* CHAPITRE V

VIBRATIONS DES VERGES, DES LAMES, DES PLAQUES ET DES MEMBRANES.

221. Vibrations des verges et des lames. — Les verges et les lames minces, de bois, de vêrre, de métal, et surtout d'acier

Fig. 141 ($h = 1^m,80$).

trempé, vibrent en vertu de leur élasticité, et présentent, comme les cordes, deux sortes de vibrations, les unes transversales, les

autres longitudinales. On fait naître les premières en fixant les verges et les lames par un bout, et en passant un archet sur la partie libre. On produit les vibrations longitudinales dans une verge en la fixant en l'un de ses points et en la frottant, dans le sens de sa longueur, avec un morceau de drap mouillé ou saupoudré de colophane. Toutefois, dans ce dernier cas, on n'obtient un son qu'autant que le point de la verge qu'on a fixé en marque la moitié, le tiers, le quart, en un mot, une partie aliquote.

On démontre, par le calcul, *que le nombre des vibrations transversales des verges et des lames de même nature est en raison directe de leur épaisseur et en raison inverse du carré de leur longueur*. La largeur des lames n'a pas d'influence sur le nombre des vibrations qu'elles peuvent rendre; elle fait seulement varier la force nécessaire pour les ébranler.

Dans les verges élastiques de même nature, *le nombre des vibrations longitudinales est en raison inverse de leur longueur, quels que soient leur diamètre et la forme de leur section transversale.*

La figure 141 représente un instrument fondé sur les vibrations longitudinales des verges. Cet instrument, construit par M. Marloye, consiste en un socle plein, en bois, sur lequel sont fixées vingt verges cylindriques en sapin, les unes colorées, les autres blanches. Leurs longueurs sont déterminées de manière que les verges blanches donnent la gamme diatonique, tandis que les demi-tons, qui complètent cette gamme et la rendent chromatique, sont donnés par les verges colorées. Pour jouer un air avec cet instrument, on frotte les verges, dans le sens de leur longueur, entre le pouce et l'index, qu'on a trempés préalablement dans de la résine en poudre. Les sons qu'on obtient ainsi ont une grande ressemblance avec ceux de la flûte de Pan.

222. Vibrations des plaques. — Lorsqu'on veut mettre une plaque en vibration, on la fixe par son centre, comme le représente la figure 142, et on l'ébranle sur ses bords au moyen d'un archet; ou bien on la fixe par quelque point de sa surface, et on l'ébranle à son centre, percé, pour cela, d'une ouverture, dans laquelle on détermine un frottement à l'aide de crins enduits de colophane (fig. 143).

Les plaques qu'on fait vibrer présentent des lignes nodales (202) qui varient par leur nombre et leur position, selon la forme des plaques, leur élasticité, le mode d'ébranlement et le nombre des vibrations. On rend les lignes nodales apparentes en recouvrant

les plaques d'une légère couche de sable avant de les faire vibrer. Aussitôt que les vibrations commencent, le sable abandonne les parties vibrantes, et vient se déposer sur les lignes nodales, ainsi que le montrent les figures 142 et 143.

On détermine la position des lignes nodales, pour ainsi dire à volonté, en touchant les parties où l'on désire qu'elles se produisent. Le nombre de ces lignes est généralement d'autant plus considérable que le nombre des vibrations est plus grand, c'est-à-dire que

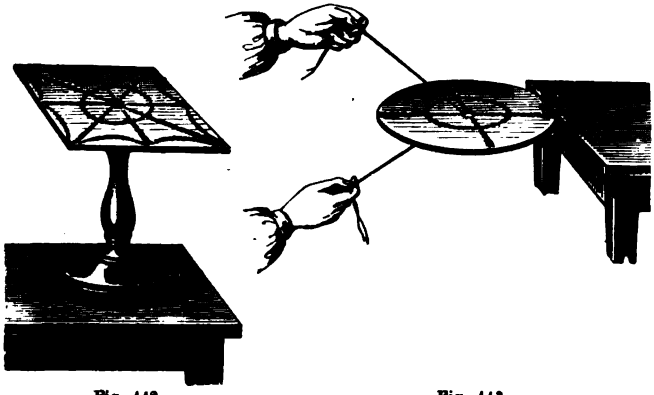


Fig. 142. Fig. 143.

le son rendu par les plaques est plus aigu. Les lignes nodales présentent toujours une grande symétrie de forme, et pour une même plaque, ébranlée dans les mêmes conditions, elles se reproduisent identiquement. C'est Chladni qui, le premier, a fait connaître le phénomène des lignes nodales dans les plaques.

Les vibrations des plaques sont soumises aux lois suivantes : *Pour des plaques de même nature, de même forme, donnant les mêmes figures, le nombre des vibrations est en raison directe des épaisseurs de ces plaques, et en raison inverse de leurs surfaces.*

223. Vibrations des membranes. — La flexibilité des membranes ne leur permet pas de vibrer, si elles ne sont tendues comme la peau d'un tambour. Elles rendent alors un son d'autant plus aigu qu'elles sont de plus petite dimension et plus fortement tendues. Pour obtenir des membranes vibrantes, Savart collait, sur des cadres de bois, de la baudruche très-flexible.

Les membranes peuvent vibrer par percussion, comme dans le tambour, ou par influence. En effet, Savart a observé qu'une membrane peut vibrer sous l'influence des vibrations de l'air, quel que soit le nombre de ces vibrations, pourvu qu'elles soient assez intenses. La figure 144 représente une membrane vibrant sous l'influence des vibrations qu'imprime à l'air un timbre sonore. Du

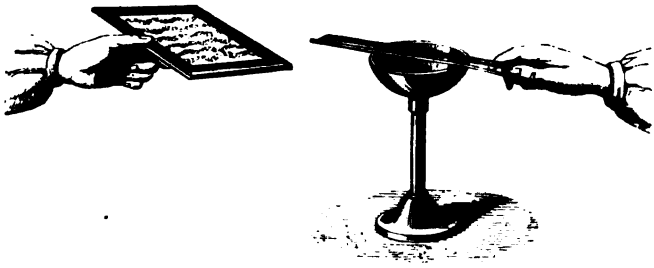


Fig. 144.

sable fin, répandu sur la membrane, montre la formation des nœuds et des ventres, de même que sur les plaques.

CHAPITRE VI

ÉTUDE OPTIQUE DES MOUVEMENTS VIBRATOIRES.

224. Méthode de M. Lissajous pour rendre les vibrations apparentes. — Dans l'étude des vibrations des plaques et des membranes, on a vu ci-dessus comment on rend apparent leur mouvement vibratoire en les saupoudrant de sable léger. Or, M. Lissajous, professeur de physique au lycée Saint-Louis, a récemment adopté une méthode bien préférable, qui non-seulement rend visible le mouvement vibratoire des corps sonores soit directement, soit par projection sur un écran, mais permet de comparer, *sans le secours de l'oreille*, les mouvements vibratoires de deux corps sonores, de façon à reconnaître le rapport exact des vibrations qu'ils exécutent dans le même temps.

La méthode de M. Lissajous, fondée sur la persistance des sensations visuelles sur la rétine, consiste à fixer sur le corps vibrant

un petit miroir métallique qui vibre avec lui et imprime à un faisceau lumineux un mouvement vibratoire semblable à celui dont il est animé lui-même.

M. Lissajous opère avec des diapasons, et pour rendre visible le mouvement de ces appareils, il fixe à l'une des branches un petit miroir de métal *m* (fig. 145), puis à l'autre branche un

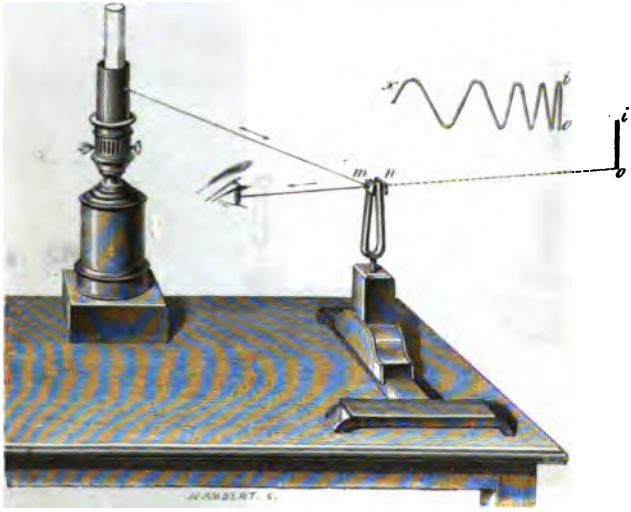


Fig. 145.

contre-poids *n*, ce qui est nécessaire pour que le diapason vibre longtemps et régulièrement. A quelques mètres du miroir est une lampe entourée d'une cheminée opaque dans laquelle est percé un petit trou qui donne un simple point lumineux. Cela posé, le diapason étant d'abord au repos, on place l'œil de manière à voir l'image du point lumineux en *o*. Puis faisant vibrer le diapason, on voit aussitôt l'image s'allonger dans le sens de la longueur des branches et donner une image persistante *oi*, qui diminue de grandeur en même temps que l'amplitude des oscillations décroît. Si au mouvement oscillatoire que possède le miroir on ajoute un mouvement de rotation en faisant tourner le diapason autour de son axe, alors, au lieu d'une image rectiligne *io*, on a une image sinueuse *oix*. Ces différents effets s'expliquent par les déplace-

ments successifs qu'impriment au pinceau lumineux réfléchi les vibrations du miroir, et par la durée, dans l'œil, de la sensation lumineuse après que la cause en a cessé, phénomène sur lequel nous reviendrons en traitant de la vision.

Si au lieu de voir directement les effets qui viennent d'être décrits, on veut les rendre visibles par projection sur un écran, on

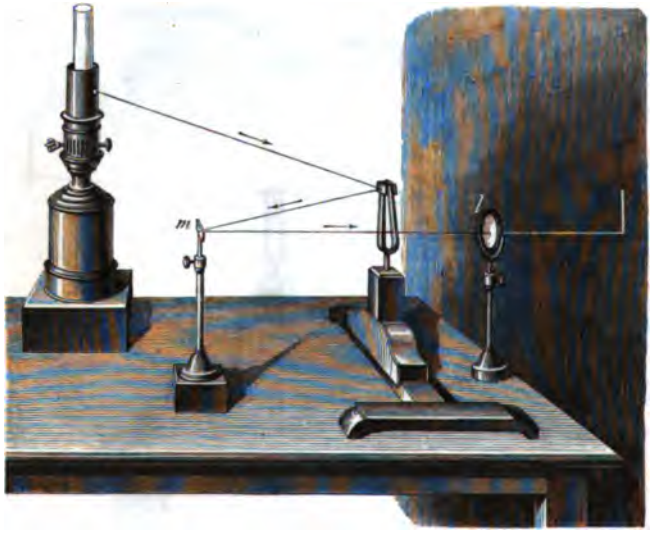


Fig. 146.

dispose l'expérience comme le montre la figure 146. Le pinceau réfléchi sur le miroir vibrant, vient se réfléchir une seconde fois sur un miroir fixe *m*, qui le renvoie vers une lentille achromatique *l*, placée de façon à former nettement sur un écran les mêmes images qu'on aperçoit directement dans l'expérience de la figure 145.

225. **Composition optique de deux mouvements vibratoires de même direction.** — Après être parvenu à rendre visibles les vibrations des corps sonores en donnant un vif éclat à l'un des points du corps vibrant, M. Lissajous a encore résolu le problème de la composition optique de deux mouvements vibratoires de même direction d'abord, puis ensuite de direction rectangulaire; et c'est

ici que l'habile physicien arrive à faire avec l'œil les études acoustiques les plus complètes et les plus savantes.

Pour composer deux mouvements vibratoires parallèles, l'expérience est disposée comme on le voit dans la figure 147. Deux diapasons, armés de miroirs, étant disposés en regard l'un de l'autre, la lumière réfléchie sur l'un des miroirs, revient sur l'autre, qui est sensiblement parallèle au premier, et de là est renvoyée vers un écran, après avoir traversé une lentille convergente.

Cela posé, si l'on ne fait vibrer d'abord que le premier diapa-

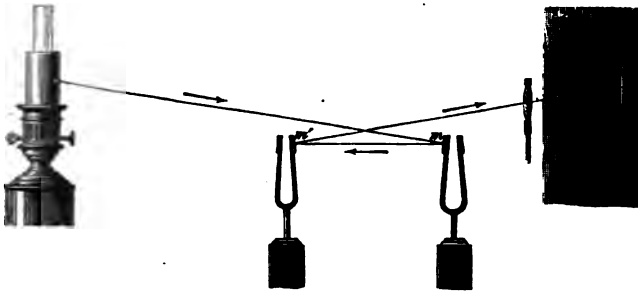


Fig. 147.

son, l'image s'allonge, comme on l'a déjà vu dans l'expérience de la figure 145; mais si on les fait vibrer tous les deux, en les supposant parfaitement à l'unisson, l'allongement augmente ou diminue, suivant qu'il y a concordance ou discordance entre les mouvements simultanés imprimés à l'image par les vibrations des miroirs.

Si les deux diapasons passent en même temps et dans le même sens par leur forme d'équilibre, l'image atteint son maximum de grandeur. Au contraire, s'ils y passent en même temps, mais en sens contraire, il y a minimum. Entre ces deux limites, l'amplitude de l'image varie avec le temps plus ou moins long qui s'écoule entre les moments précis où les deux diapasons passent par leur forme d'équilibre. Le rapport entre ce temps et la durée d'une vibration double a été désigné par M. Lissajous sous la dénomination de *différence de phase*.

Lorsque les diapasons sont rigoureusement d'accord, la trace lumineuse portée sur l'écran n'éprouve qu'un décroissement pro-

gressif de longueur, à mesure que l'amplitude des vibrations diminue; mais si l'accord est tant soit peu altéré, la grandeur de l'image varie périodiqnement, et tandis que l'oreille entend les battements (214) qui résultent du défaut d'accord, l'œil voit nettement les pulsations concomitantes de l'image.

226. Composition optique de deux mouvements vibratoires rectangulaires. — La composition optique de deux mouvements vibratoires rectangulaires s'opère comme on le voit dans la figure 148, c'est-à-dire à l'aide de deux diapasons, l'un horizontal,

Fig. 148.

l'autre vertical, et armés tous les deux de miroirs comme dans les expériences précédentes. Si l'on ne fait vibrer d'abord que le diapason horizontal, on voit se former sur l'écran une trace lumineuse horizontale; si c'est le second diapason qui vibre seul, l'image est verticale. Mais si l'on fait résonner à la fois les deux diapasons, les deux mouvements se combinent, et le faisceau réfléchi décrit sur l'écran un courbe plus ou moins compliquée, dont la forme dépend du rapport entre les nombres de vibrations exécutées dans le même temps par les deux diapasons; et c'est ici qu'on obtient de précieuses indications pour comparer les nombres de vibrations des deux corps sonores.

La figure 149 représente les différentes formes que présente la projection lumineuse sur l'écran quand les deux diapasons sont à l'unisson, c'est-à-dire quand leurs nombres de vibrations sont entre eux comme 1 est à 1.

Fig. 149.

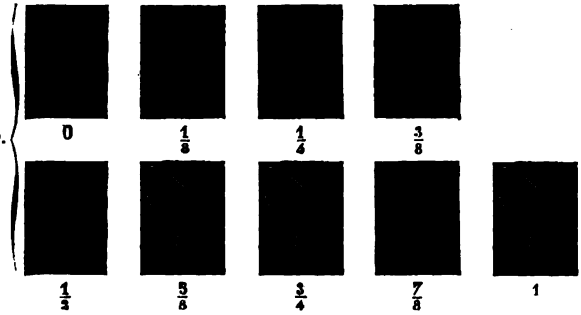


Fig. 150.

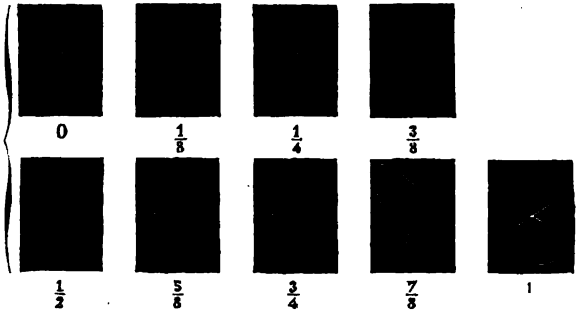
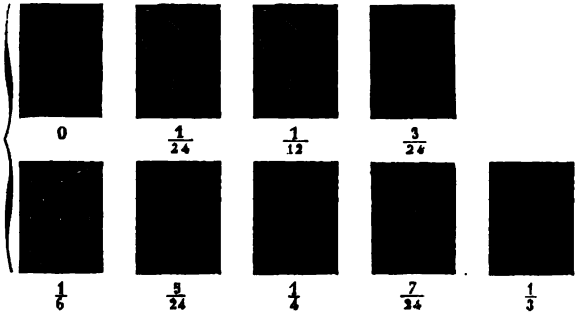


Fig. 151.



Les fractions placées au-dessous de chaque courbe indiquent les différences de phases correspondant à chacune d'elles. C'est la différence de phase qui détermine la forme initiale de la courbe; mais celle-ci conserve exactement la même forme lorsque les diapasons sont d'accord, à la condition toutefois que les amplitudes des deux vibrations rectangulaires décroissent dans le même rapport.

Si les diapasons ne sont pas tout à fait d'accord, la différence initiale de phase ne se maintient pas, et la courbe passe par toutes ses variétés; et elle semble se balancer sur elle-même avec d'autant plus de rapidité que les diapasons sont plus loin de l'accord.

La figure 150 représente les différents aspects qu'offre l'image lumineuse quand les diapasons sont à l'octave, c'est-à-dire quand leurs nombres de vibrations sont entre eux comme 1 est à 2; et la figure 151 donne la série de courbes qu'on obtient quand les nombres de vibrations sont entre eux comme 3 est à 4.

On voit que les courbes sont de plus en plus compliquées à mesure que les deux termes du rapport des nombres de vibrations prennent une valeur plus élevée. Quant à l'examen théorique de ces courbes et des phénomènes qu'elles représentent, nous renvoyons le lecteur au savant mémoire de M. Lissajous (*Annales de physique et de chimie*, année 1837), où l'on trouvera le tracé géométrique des courbes de vibrations et le calcul de leur équation générale.

Dans les différentes expériences décrites ci-dessus, nous avons supposé qu'on prenait simplement pour source de lumière une lampe ordinaire; en faisant usage de la lumière électrique, par exemple de l'appareil photo-électrique de M. Duboscq, ces phénomènes prennent un éclat remarquable, et c'est certes une des plus belles expériences de physique que ce concours prêté par la lumière aux phénomènes de l'acoustique, pour dessiner en trait de feu des courbes qui caractérisent si bien les vibrations transversales, longitudinales ou tournantes, l'accord, l'octave, la tierce, la quarte, la quinte, les dissonances, les battements, les sons résultants, etc.

LIVRE VI

DU CALORIQUE

CHAPITRE PREMIER

NOTIONS PRÉLIMINAIRES; THERMOMÈTRES.

227. Calorique; hypothèses sur sa nature. — On donne le nom de *calorique* à l'agent qui fait naître en nous la sensation de la chaleur. Mais cet agent agit aussi sur les corps inertes; c'est lui qui fait fondre la glace, bouillir l'eau, rougir le fer.

De nombreuses opinions ont été émises sur la cause de la chaleur. Deux seulement règnent encore dans la science : le *système de l'émission* et *celui des ondulations*.

Dans le premier système, on admet que la cause de la chaleur est un fluide matériel, impondérable, qui peut passer d'un corps à un autre, et dont les molécules sont dans un état continuel de répulsion. Ce fluide existerait dans tous les corps accumulés autour des molécules et s'opposant à leur contact immédiat.

Dans le système des ondulations, on admet que la chaleur est due à un mouvement vibratoire des molécules des corps chauds, lequel mouvement se transmet aux molécules des autres corps par l'intermédiaire d'un fluide éminemment substil et élastique, qu'on nomme *éther*, et dans lequel il se propage à la manière des ondes sonores dans l'air. Les corps les plus chauds sont alors ceux dont les vibrations ont une plus grande amplitude et une plus grande rapidité, et l'intensité de la chaleur ne serait autre chose que la résultante des vibrations des molécules. Dans la première hypothèse, les molécules des corps qui se refroidissent perdent du calorique, dans la seconde, elles ne perdent que du mouvement.

Depuis les progrès de la physique moderne, la théorie des ondulations paraît seule admissible. Toutefois, comme celle de l'émission simplifie les démonstrations, on la préfère, en général, pour l'explication des phénomènes de la chaleur.

228. **Effets généraux du calorique.** — L'action générale du calorique sur les corps est de développer entre leurs molécules une force répulsive luttant sans cesse contre l'attraction moléculaire; il en résulte que, sous l'influence de cet agent, les corps tendent d'abord à *se dilater*, c'est-à-dire à prendre un volume plus grand,

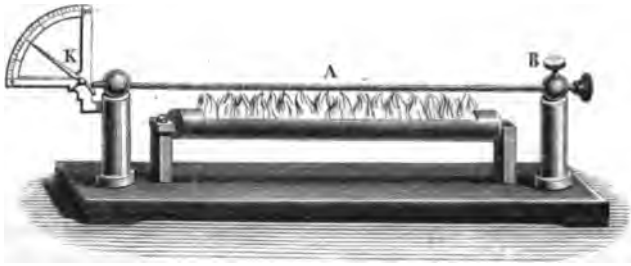


Fig. 152 (1 = 50).

puis ensuite à *changer d'état*, c'est-à-dire à passer de l'état solide à l'état liquide, ou de l'état liquide à celui de fluide aériforme.

Tous les corps se dilatent par l'effet du calorique. Les plus dilatables sont les gaz, après eux les liquides, et ensuite les solides. Dans ces derniers, on distingue la dilatation *linéaire*, c'est-à-dire suivant une seule dimension, et la dilatation *cubique*, c'est-à-dire en volume. Toutefois, ces dilatations n'ont jamais lieu l'une sans l'autre. Dans les liquides et dans les gaz, il n'y a lieu de considérer que des dilatations en volume.

Pour démontrer la dilatation linéaire des métaux, on fait usage de l'appareil représenté dans la figure 152. Une tige métallique A est maintenue fixe à l'une de ses extrémités par une vis de pression B, tandis qu'à l'autre elle est libre et en contact avec le plus petit bras d'une aiguille K, mobile sur un cadran. Au-dessous de la tige est un réservoir cylindrique dans lequel on brûle de l'alcool. L'aiguille K est d'abord au zéro du cadran; mais à mesure que le tige A s'échauffe, on voit l'aiguille monter, ce qui rend sensible l'allongement de la tige.

La dilatation cubique des solides se démontre au moyen de l'*anneau de S'Gravesande*. On nomme ainsi un petit anneau métallique *m* (fig. 153) dans lequel passe librement, à la température ordinaire, une petite boule de cuivre rouge *a*, ayant à peu près le même diamètre que lui. Mais lorsque cette boule a été chauffée à

la flamme d'une lampe à alcool, elle ne peut plus passer à travers l'anneau, ce qui démontre l'accroissement de volume.

Pour constater la dilatation des liquides, on soude à un petit ballon de verre un tube capillaire. Le ballon et une partie du tube étant remplis d'un liquide quelconque, on remarque qu'aussitôt qu'on l'échauffe, ce liquide s'élève dans le tube, et la dilatation observée ainsi est toujours beaucoup plus grande que dans les solides.

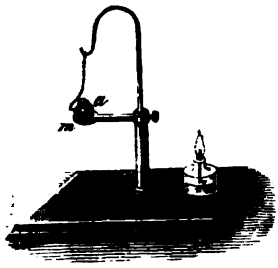


Fig. 153 (h = 26).

Le même appareil peut servir à montrer la dilatation des gaz. Pour cela, on remplit le ballon d'air ou de tout autre gaz, et on introduit, dans le tube, un index de mercure de 2 ou 3 centimètres de longueur. Lorsqu'on échauffe le ballon, seulement en approchant la main, l'index est refoulé vers l'extrémité du tube, et finit par en être expulsé; d'où l'on conclut que, même pour un faible accroissement de chaleur, les gaz sont très-dilatables.

Dans ces diverses expériences, dès que les corps se refroidissent ils se contractent, et lorsque la chaleur est revenue au même degré, ils reprennent exactement leur volume primitif.

MESURE DES TEMPÉRATURES.

229. **Température.** — La *température* d'un corps est l'état actuel du calorique sensible dans ce corps, sans augmentation ni diminution. Si la quantité de chaleur sensible augmente ou diminue, on dit que la température s'élève ou s'abaisse.

230. **Thermomètres.** — On appelle *thermomètres* des instruments qui servent à mesurer les températures.

L'imperfection de nos sens ne nous permettant pas de mesurer la température des corps d'après les sensations plus ou moins vives de chaleur ou de froid qu'ils excitent en nous, on a dû recourir aux effets physiques que le calorique produit sur les corps. Ces effets sont de plusieurs sortes. On a adopté les dilatations et les contractions comme étant les plus simples à observer. Mais la chaleur donne aussi naissance, dans les corps, à des phénomènes électriques au moyen desquels on peut mesurer les températures. Nous

décrirons plus tard un thermomètre extrêmement sensible, fondé sur ce principe.

De tous les corps, ceux qui méritent la préférence pour la construction des thermomètres, sont les liquides, les solides n'étant pas assez dilatables, et les gaz l'étant trop. Les liquides exclusivement adoptés sont le mercure et l'alcool; le premier, parce qu'il n'entre en ébullition qu'à une température très-élevée, et le second, parce qu'il ne se solidifie point par les plus grands froids connus.

L'invention des thermomètres date de la fin du XVIe siècle. Elle est attribuée, par les uns, à Galilée; par les autres, à Drebbel, médecin hollandais, ou à Santorius, médecin vénitien.

Le thermomètre à mercure est celui dont l'usage est le plus répandu. Il se compose d'un tube capillaire, de verre ou de cristal, soudé à un réservoir cylindrique ou sphérique de même matière. Le réservoir et une partie de la tige sont remplis de mercure, et une échelle, graduée sur le tube même, ou sur une règle qui lui est parallèle, fait connaître la dilatation du liquide (fig. 158, page 219).

Outre la soudure de la tige au réservoir, laquelle se fait au moyen de la lampe d'émailleur, la construction d'un thermomètre comprend trois opérations : la division du tube en parties d'égale capacité, l'introduction du mercure dans le réservoir et la graduation.

231. Division du tube en parties d'égale capacité. — Les indications du thermomètre n'étant exactes qu'autant que les divisions de l'échelle placée sur le tube correspondent à des dilatations égales du mercure qui est dans le réservoir, il importe que l'échelle soit graduée de manière à indiquer des capacités égales dans l'intérieur du tube. Si celui-ci était parfaitement cylindrique et d'un diamètre constant, il suffirait, pour obtenir des capacités egales, de diviser la longueur du tube en parties égales. Mais le diamètre des tubes de verre étant, en général, plus fort à une extrémité qu'à l'autre, il en résulte que des capacités égales du tube sont représentées, sur l'échelle, par des longueurs inégales. Ce sont ces dernières qu'il s'agit de déterminer.

Pour cela, avant que le tube soit soudé au réservoir, on y introduit une colonne de mercure de 2 à 3 centimètres, qu'on a soin de maintenir à la même température, et qu'on promène dans le tube de manière qu'à chaque déplacement la colonne avance juste d'une quantité égale à sa longueur; c'est-à-dire qu'une des extrémités de la colonne vient successivement prendre la place de l'autre. Une règle divisée en millimètres, sur laquelle, à chaque déplacement, est appliqué le tube, permet d'évaluer, à un dixième de millimètre

près, la longueur occupée par la colonne de mercure. S'il arrive que cette longueur demeure invariable, c'est signe que la capacité du tube est partout la même; mais si elle varie, et va, par exemple, en décroissant, cela montre que le diamètre intérieur du tube augmente. Si l'on observe ainsi que la colonne de mercure éprouve des variations de longueur de plusieurs millimètres, on rejette le tube, et on en cherche un plus régulier. Mais si ces variations sont peu considérables, on colle le long du tube une bande de papier, et on marque un trait, au crayon, en regard des points occupés successivement par les extrémités de la colonne de mercure.

Les divisions ainsi formées indiquent nécessairement des capacités égales, puisqu'elles correspondent à un même volume de mercure. Or, les intervalles de ces divisions étant assez rapprochés pour qu'on puisse regarder le diamètre du tube comme constant dans chacune d'elles, on passe à des divisions plus petites, en partageant les premières en un certain nombre de parties égales; ce qui s'obtient, comme il a déjà été dit, au moyen de la machine à diviser (13).

On verra bientôt comment, à l'aide de ces divisions, on obtient une graduation exacte de l'échelle (236).

232. **Remplissage du thermomètre.** — Pour introduire le mercure dans le thermomètre, on soude, à l'extrémité supérieure de la tige, un entonnoir C (fig. 154) qu'on remplit de mercure; puis, inclinant un peu le tube, on dilate l'air qui est dans le réservoir, en chauffant celui-ci avec une lampe à alcool, ou en le plaçant sur une grille inclinée, puis en l'entourant de charbons incandescents. L'air dilaté sort en partie par l'entonnoir C. Si on laisse alors refroidir le tube et qu'on le tienne dans une position verticale, l'air qui reste se contracte, et la pression atmosphérique force le mercure à passer dans le réservoir D, quelque capillaire que soit le tube. Mais le mercure cesse bientôt de pénétrer dans le réservoir, ce qui arrive lorsque l'air qui s'y trouve encore a pris, par la diminution de volume, une tension capable de faire équilibre au poids de l'atmosphère et à celui de la colonne de mercure qui est dans le tube. Chauffant alors de nouveau et laissant refroidir, il rentre une nouvelle quantité de mercure, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il ne reste plus, dans le réservoir D, qu'un très-petit volume d'air. Pour le chasser, on chauffe alors jusqu'à ce que le mercure qui est dans ce réservoir entre en ébullition. Les vapeurs de mercure, en se dégageant, entraînent avec elles l'air et l'humidité qui se trouvaient encore dans le tube et dans le réservoir.

Lorsque l'instrument est ainsi rempli de mercure sec et pur, on enlève l'entonnoir C, puis on ferme le tube en en soudant l'extrémité à la lampe. Mais on a soin de chauffer auparavant le réservoir D, de manière à chasser la moitié ou les deux tiers du mercure qui est dans le tube; sinon ce liquide ne pourrait se dilater sans briser le thermomètre. La quantité de mercure à expulser du tube est d'autant plus grande que l'instrument est destiné à mesurer des températures plus élevées. On a soin, en outre, au moment où l'on ferme le tube, de chauffer le réservoir D de manière que le liquide dilaté monte au sommet du tube. De la sorte, il ne reste pas d'air dans le thermomètre, ce qui est nécessaire, sinon l'air comprimé, lorsque le mercure s'élève, pourrait faire éclater le tube.

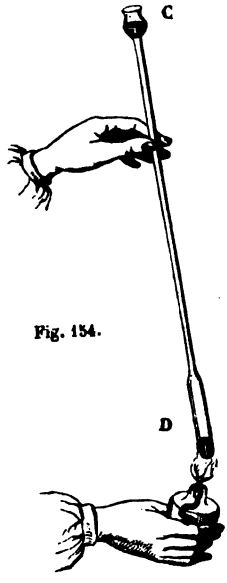


Fig. 154.

233. **Graduation du thermomètre, points fixes de son échelle.** — Après avoir rempli le thermomètre comme il vient d'être dit, il reste à le graduer, c'est-à-dire à tracer sur la tige une échelle qui permette d'apprécier les variations de température. Pour cela, il a fallu se donner, sur cette tige, deux points fixes qui représentassent des températures faciles à reproduire et toujours identiques.

Or, l'expérience a fait connaître que la température de fusion de la glace est toujours la même, quelle que soit la source de chaleur, et que l'eau distillée, sous la même pression et dans un vase de même matière, entre constamment en ébullition à la même température. En conséquence, on a pris pour premier point fixe, c'est-à-dire pour le zéro de l'échelle, la température de la glace fondante, et pour second point fixe, qu'on représente par 100, la température d'ébullition de l'eau distillée, dans un vase de métal, la pression atmosphérique étant $0^{m},76$.

La graduation du thermomètre comprend donc trois opérations : la détermination du zéro, celle du point 100 et le tracé de l'échelle.

234. **Détermination du zéro.** — Pour trouver le zéro, on remplit de glace pilée, ou de neige, un vase dont le fond est percé d'un

trou pour laisser écouler l'eau qui provient de la fusion de la glace (fig. 155). On plonge le réservoir du thermomètre et une partie de la tige dans cette glace, pendant un quart d'heure environ. La colonne de mercure s'abaisse d'abord rapidement, puis reste stationnaire. Alors, au point qui correspond au niveau du mercure, on marque un trait au crayon, sur une petite bande de papier préalablement collée sur la tige : c'est la place du zéro.

Fig. 155. (h = 32).

235. **Détermination du point 100.** — Le second point fixe se détermine au moyen de l'appareil représenté dans les figures 156 et 157. La deuxième en montre une coupe verticale, la première en montre l'ensemble pendant qu'il fonctionne. Dans toutes les deux, les mêmes lettres désignent les mêmes pièces. Tout l'appareil est en cuivre rouge. Une tubulure centrale A, ouverte à ses deux bouts, est fixée sur un vase cylindrique M, contenant de l'eau; une seconde tubulure B, concentrique à la première, et l'entourant en entier, est fixée sur le même vase M. Cette seconde enveloppe, fermée à ses deux extrémités, est munie de trois tubulures *a*, E, D; dans la première est un bouchon dans lequel passe la tige *t* du thermomètre dont on cherche le point 100; à la seconde est adapté un tube de verre *m*, contenant du mercure, et destiné à servir de manomètre pour mesurer la tension de la vapeur dans l'appareil; enfin, la troisième tubulure D sert de dégagement à la vapeur et à l'eau résultant de la condensation.

Cela posé, l'appareil étant placé sur un fourneau et chauffé jusqu'à l'ébullition, la vapeur produite dans le vase M s'élève dans le tube A et se rend entre les deux enveloppes, comme le montrent les flèches, jusqu'à la tubulure D, d'où elle se dégage dans l'atmosphère. Le thermomètre *t* se trouvant ainsi entouré par la vapeur, le mercure qu'il contient se dilate, et lorsqu'il est devenu stationnaire, on marque au point *a*, où il s'arrête, un trait qui est le point 100 cherché. La deuxième enveloppe B a éte ajoutée à l'appareil que nous venons de décrire par M. Regnault, pour éviter le refroidissement de la tubulure centrale par son contact avec l'air.

La détermination du point 100 de l'échelle thermométrique semble exiger que la hauteur du baromètre soit $0^m,76$ pendant l'expérience, car on verra bientôt que, lorsque cette hauteur est plus grande ou plus faible que $0^m,76$, l'eau entre en ébullition à une température

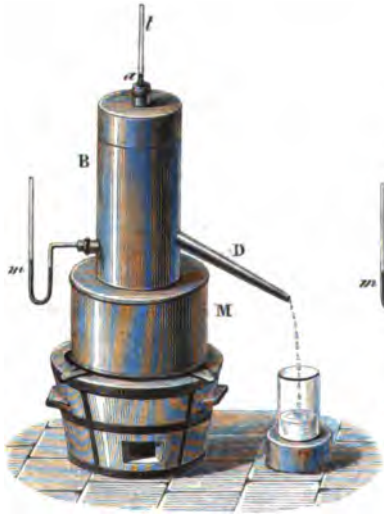


Fig. 156.

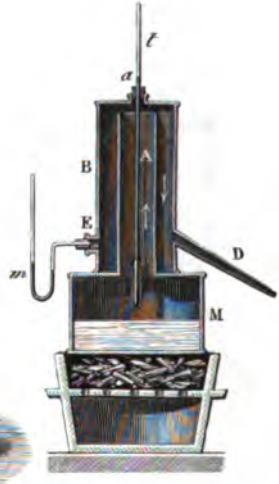


Fig. 157.

au-dessus ou au-dessous de 100 degrés. Toutefois, on peut obtenir exactement le point 100, quelle que soit la pression atmosphérique, en faisant la correction indiquée par M. Biot. Ce savant a constaté que lorsque, dans le baromètre, le mercure s'élève ou s'abaisse de 27 millimètres, la température d'ébullition monte ou descend d'un degré ; par conséquent, si la hauteur du baromètre est, par exemple, 778 millimètres, c'est-à-dire de 18 millimètres, ou des deux tiers de 27, au-dessus de 760, l'eau bout à 100 degrés plus deux tiers. C'est donc 100 et $\frac{2}{3}$ qu'on devra marquer au point où s'arrête le mercure.

Gay-Lussac ayant observé que l'eau entre en ébullition à une température un peu plus haute dans un vase de verre que dans un vase de métal, et, de plus, la température d'ébullition étant élevée par les sels que l'eau tient en dissolution, on a admis jusqu'à ces derniers temps que, pour déterminer le point 100 des thermomètres,

il fallait faire usage d'un vase de métal et d'eau distillée. Mais ces deux dernières conditions sont inutiles à observer depuis la découverte de M. Rudberg, physicien suédois. Ce savant a reconnu, en effet, que la nature du vase et les sels en dissolution influent bien sur la température d'ébullition de l'eau, mais *non sur celle de la vapeur qui se produit*. C'est-à-dire que l'eau étant à plus de 100 degrés, par l'une des causes ci-dessus, la vapeur qui s'en dégage est néanmoins à 100 degrés, si la pression est $0^m,76$.

Fig. 158.

Dès lors, pour prendre le second point fixe du thermomètre, il n'est pas nécessaire de faire usage d'eau distillée, ni d'un vase de métal. Il suffit, la pression étant $0^m,76$, ou la correction se faisant comme ci-dessus, que le thermomètre plonge tout entier dans la vapeur et non dans l'eau chaude.

Du reste, même en faisant usage d'eau distillée, le réservoir du thermomètre ne doit pas plonger dans l'eau bouillante; car il n'y a que la surface de celle-ci qui soit réellement à 100 degrés, la température croissant de tranche en tranche vers le fond, à cause de l'excès de pression.

236. **Construction de l'échelle.** — Les deux points fixes obtenus, on partage l'intervalle qui les sépare en 100 parties d'égale capacité, qu'on nomme *degrés*, et on prolonge ces divisions sur toute la longueur de l'échelle, comme le montre la figure 158. Il suffirait, pour tracer les degrés, de partager l'intervalle du zéro à 100 en cent parties égales, si le tube du thermomètre avait partout le même diamètre; mais cette condition n'étant jamais rigoureusement satisfaite, c'est ici qu'il faut faire usage des divisions en parties d'égale capacité qui ont d'abord été tracées sur le tube (231). Pour cela, on compte le nombre de ces divisions comprises entre les deux points fixes, et, divisant ce nombre par 100, on a le nombre de divisions ou la fraction de division qui équivaut à un degré; on en déduit successivement, à partir du zéro, la position de chaque degré. Le thermomètre ainsi gradué est le *thermomètre centigrade*.

Les degrés se désignent par un petit zéro placé à droite du nombre qui marque la température, et un peu au-dessus. Enfin, pour distinguer les températures au-dessous de zéro de celles qui sont au-dessus, on les fait précéder du signe — (*moins*) : 15 degrés au-dessous de zéro s'indiquent donc par — 15°.

Dans les thermomètres de précision, l'échelle est graduée sur le verre même de la tige. Elle ne peut ainsi se déplacer, et sa longueur reste sensiblement constante, le verre étant très-peu dilatable.

Pour obtenir sur le verre des traits permanents, on recouvre, à chaud, la tige thermométrique d'une légère couche de vernis, puis, avec une pointe d'acier, on marque, sur le vernis, les traits de l'échelle, ainsi que les chiffres correspondants; on expose enfin la tige, pendant dix minutes environ, à des vapeurs d'acide fluorhydrique, qui jouit de la propriété d'attaquer le verre, et qui grave les traits en creux, partout où le vernis a été enlevé.

237. **Différentes échelles thermométriques.** — On distingue, dans la graduation des thermomètres, trois échelles : l'échelle centigrade, l'échelle de Réaumur et l'échelle de Fahrenheit.

L'échelle centigrade est celle qui a été construite ci-dessus, et dont on fait généralement usage en France. Elle est due à Celsius, physicien suédois, mort en 1744.

Dans la seconde échelle, adoptée en 1731 par Réaumur, physicien français, les deux points fixes correspondent encore à la température de la glace fondante et à celle de l'eau bouillante; mais leur intervalle est partagé en 80 degrés. C'est-à-dire que 80 degrés Réaumur équivalent à 100 degrés centigrades; 1 degré R. égale donc $\frac{100}{80}$ ou $\frac{5}{4}$ de degré c.; et, réciproquement, 1 degré c. égale $\frac{80}{100}$ ou $\frac{4}{5}$ de degré R. Par conséquent, pour convertir un nombre de degrés R. en degrés c., 20 degrés, par exemple, il faut multiplier ce nombre par $\frac{5}{4}$, car un degré R. égalant $\frac{5}{4}$ de degré c., 20 degrés R. valent en degrés c. 20 fois $\frac{5}{4}$, ou 25. On verra de même que, pour convertir les degrés c. en degrés R., il faut les multiplier par $\frac{4}{5}$.

Fahrenheit, à Dantzick, adopta, en 1714, une échelle thermométrique, dont l'usage s'est répandu depuis en Hollande, en Angleterre et dans l'Amérique du Nord. Le point fixe supérieur de cette échelle correspond encore à la température de l'eau bouillante, mais le zéro correspond au degré de froid qu'on obtient en mélangeant des poids égaux de sel ammoniac pilé et de neige, et l'intervalle des deux points fixes est divisé en 212 degrés. Le thermomètre de Fahrenheit, placé dans la glace fondante, marque 32 degrés; par conséquent, 100 degrés centigrades équivalent, en degrés F., à 212

moins 32, ou 180 ; 1 degré c. vaut donc $\frac{180}{100}$ ou $\frac{9}{5}$ de degré F., et, réciproquement, 1 degré F. égale $\frac{100}{180}$ ou $\frac{5}{9}$ de degré c.

Cela posé, soit à convertir en degrés c. un certain nombre de degrés F., 95 par exemple. Pour cela, on doit d'abord retrancher 32 du nombre donné, afin de compter les deux sortes de degrés d'un même point de la tige. Le reste est ici 63 ; or, 1 degré F. valant $\frac{5}{9}$ de degré c., 63 degrés F. égalent $\frac{5}{9} \times 63$, ou 35 degrés c.

Réciproquement, pour convertir des degrés c. en degrés F., on multiplie le nombre donné par $\frac{9}{5}$ et on ajoute 32 au produit.

238. **Déplacement du zéro.** — Les thermomètres construits même avec le plus grand soin sont soumis à une cause d'erreur dont il importe de tenir compte : c'est qu'avec le temps, le zéro tend à se relever, le déplacement allant quelquefois jusqu'à deux degrés. C'est-à-dire que le thermomètre étant plongé dans la glace fondante, le mercure ne descend plus au zéro de l'échelle.

On a donné de ce phénomène diverses explications, dont aucune ne satisfait complétement. On l'a attribué à une diminution de volume du réservoir, laquelle résulterait de la pression extérieure, le vide étant fait dans le thermomètre ; mais on a observé que des thermomètres qui contiennent de l'air s'altèrent comme ceux qui sont vides.

On a dit aussi que le verre, après qu'on a soufflé la boule, ne revenait que lentement à son état d'agrégation primitif, en se fondant sur ce qu'on avait cru remarquer qu'au bout de deux ou trois ans, le zéro ne se déplaçait plus. Or, d'après les expériences de M. Despretz, ce déplacement paraît se continuer pendant un temps peut-être indéfini.

Outre le déplacement lent dont on vient de parler, on observe des variations brusques dans la position du zéro, toutes les fois que le thermomètre a été porté à une température élevée. En effet, si on le plonge alors dans la glace fondante, le mercure ne descend plus au zéro de l'échelle, et il n'y revient qu'au bout d'un certain temps.

Il importe donc, lorsqu'il s'agit de mesurer une température avec précision, de vérifier d'abord la position du zéro dans le thermomètre dont on veut faire usage.

Observons encore que M. Regnault a trouvé que des thermomètres à mercure, qui sont d'accord à zéro et à 100 degrés, ne le sont pas entre ces deux points, et que leurs indications varient quelquefois de plusieurs degrés. M. Regnault pense que cette différence est due à l'inégale dilatation des verres dont les thermomètres sont formés.

Ces différentes remarques montrent combien la détermination des températures présente de chances d'erreur, et les soins qu'elle exige.

239. **Limites de l'emploi du thermomètre à mercure.** — De tous les thermomètres fondés sur la dilatation des liquides, on doit donner la préférence au thermomètre à mercure, parce que ce liquide est celui qui se dilate le plus régulièrement; on a même observé que son accroissement de volume, entre — 36 et 100 degrés, est proportionnel à l'intensité de la chaleur. Toutefois, pour les températures inférieures à — 36, il faut avoir recours au thermomètre à alcool, car le mercure se congèle à — 40 degrés, et en approchant de ce point, sa dilatation est *irrégulière*, c'est-à-dire qu'elle n'est plus proportionnelle à l'intensité de la chaleur.

Pour les températures élevées, les indications des thermomètres à mercure ne peuvent dépasser 350 degrés, température qui est celle du point d'ébullition du mercure.

240. **Thermomètre à alcool.** — Le *thermomètre à alcool* ne diffère du thermomètre à mercure que parce qu'il est rempli d'alcool coloré en rouge avec de l'orseille. Mais la dilatation des liquides étant d'autant moins régulière qu'ils sont plus voisins de leur point d'ébullition, l'alcool, qui bout à 78 degrés, se dilate très-irrégulièrement entre zéro et 100 degrés. En sorte que si, après avoir pris les deux points fixes comme pour le thermomètre à mercure, on divisait leur intervalle en 100 degrés, on aurait un thermomètre qui ne serait d'accord avec le thermomètre à mercure qu'à zéro et à 100 degrés; entre ces deux points, il serait en retard de plusieurs degrés, et on trouve même qu'il ne marque que 44 degrés, lorsque le thermomètre à mercure en marque 50.

C'est pourquoi la graduation du thermomètre à alcool doit se faire comparativement à celle d'un thermomètre étalon à mercure, en les chauffant ensemble graduellement dans un bain, et en marquant successivement, sur le thermomètre à alcool, les températures indiquées par le thermomètre à mercure. Ainsi gradué, le thermomètre à alcool est *comparable* au thermomètre à mercure, c'est-à-dire marque les mêmes températures, lorsqu'il est placé dans les mêmes conditions. Le thermomètre à alcool est surtout employé pour mesurer les très-basses températures, parce que ce liquide ne se congèle pas par les plus grands froids connus.

241. **Thermomètre différentiel de Leslie.** — Leslie, physicien écossais, mort en 1832, a construit un thermomètre à air destiné à faire connaître la différence de température de deux lieux voisins;

de là le nom de *thermomètre différentiel*. Cet instrument se compose de deux boules de verre remplies d'air et réunies par un tube recourbé, d'un petit diamètre, fixé sur une planchette (fig. 159). Avant que l'appareil soit fermé, on y introduit un liquide coloré, en quantité suffisante pour remplir la branche horizontale du tube et la moitié environ des branches verticales. Il importe de choisir un liquide qui ne donne pas de vapeur aux températures ordinaires; c'est pourquoi on fait usage, en général, d'acide sulfurique coloré en rouge. L'apareil étant ensuite fermé, on fait passer de l'air d'une boule dans l'autre, en les chauffant inégalement, jusqu'à ce qu'après quelques tâtonnements, les deux boules étant revenues à la même température, le niveau soit le même dans les branches verticales. On marque alors un zéro à chaque extrémité de la colonne liquide. Pour achever la graduation, on porte l'une des boules à une température qui surpasse de 10 degrés celle de l'autre. L'air de la première se dilate et refoule la colonne liquide *ba* qui s'élève dans l'autre branche. Lorsque cette colonne est redevenue stationnaire, on marque 10, de chaque côté, au point où s'arrête le niveau du liquide; puis on partage les intervalles de zéro à 10 en dix parties égales, et on continue les divisions au-dessus et au-dessous du zéro, le long de chaque branche.

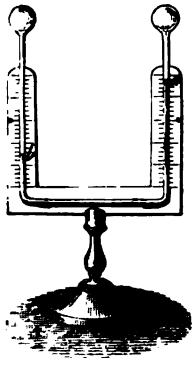


Fig. 159.

242. Thermoscope de Rumford. — Dans le même temps que Leslie inventait le thermomètre différentiel, le comte de Rumford, Américain, mort à Auteuil, près Paris, en 1814, adoptait un thermomètre analogue qui a reçu le nom de *thermoscope de Rumford*. Cet instrument diffère peu du précédent; seulement, les boules en sont plus grosses, la branche horizontale est plus grande, et c'est le long de cette branche qu'est la graduation. L'index E (fig. 160) n'a que deux centimètres de longueur environ, et on marque encore un zéro à chaque extrémité, lorsque les deux boules étant à la même température, l'index occupe le milieu de la branche horizontale. Le reste de la graduation se fait ensuite entièrement comme pour le thermomètre de Leslie. Quant à l'appendice D, il est destiné à régler l'appareil; lorsqu'il y a trop d'air dans l'une des boules, on fait passer l'index dans l'appendice, ce qui permet à l'air de se rendre

dans l'autre boule. Il suffit ensuite d'incliner le thermomètre pour faire sortir l'index et lui faire prendre la position qu'il doit occuper; ce qu'on n'obtient toutefois qu'après quelques essais. Il existe une

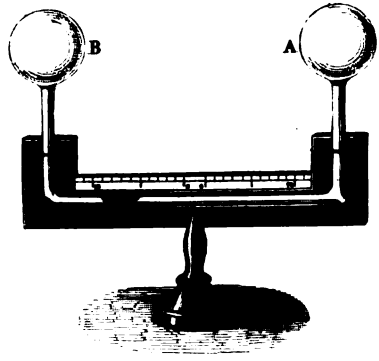


Fig. 160 (h = 43).

autre espèce de thermomètre à air que nous ferons connaître en parlant de la dilatation des gaz.

243. **Thermomètre métallique de Bréguet.** — Abraham Bréguet, horloger à Paris, mort en 1823, a imaginé un thermomètre fondé sur l'inégale dilatabilité des métaux, et remarquable par son extrême sensibilité. Cet instrument est formé de trois lames superposées, de platine, d'or et d'argent. Soudées ensemble dans toute leur longueur, elles sont ensuite passées au laminoir de manière à ne former qu'un ruban métallique très-mince. On contourne ce ruban en hélice, comme le montre la figure 161, puis, ayant fixé l'extrémité supérieure à un support, on suspend à l'autre extrémité une aiguille légère de cuivre, libre de se mouvoir sur un cadran horizontal qui porte une échelle centigrade.

Fig. 161 (h = 9).

L'argent, qui est le plus dilatable des trois métaux, forme la face intérieure de l'hélice; le platine, qui est le moins dilatable, est à l'extérieur, et l'or est entre les deux. Lorsque la température s'élève, l'argent se dilatant plus que le platine et l'or, l'hélice se déroule de gauche à droite par rapport à la figure ci-dessus. L'effet contraire a lieu lorsque la température baisse. L'or est placé entre les deux autres métaux parce qu'il a une dilatation intermédiaire entre celles de l'argent et du platine. En n'employant que ces deux derniers métaux, leur différence de dilatation pourrait occasionner une rupture. Le thermomètre de Bréguet se gradue comparativement à un thermomètre étalon à mercure.

* 244. **Thermomètre à maxima et à minima de Rutherford.** — Dans les observations météorologiques, il est nécessaire de connaître

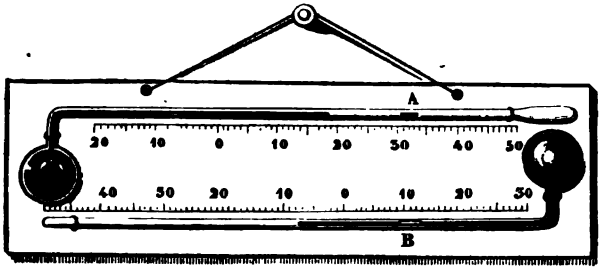


Fig. 162 (1 = 39).

la plus haute température du jour et la plus basse température de la nuit. Les thermomètres ordinaires ne pourraient conduire à la connaissance de ces températures que par une observation continue, ce qui serait tout à fait impraticable. Aussi a-t-on imaginé, à cet effet, un assez grand nombre d'instruments. Le plus simple est celui de Rutherford. Sur une glace rectangulaire (fig. 162) sont fixés deux thermomètres dont les tiges sont recourbées horizontalement. Le premier, A, est à mercure; le second, B, est à alcool. Dans le thermomètre à mercure est un petit cylindre de fer A, qui peut glisser librement dans le tube. Ce petit cylindre, qui sert d'index, étant mis en contact avec l'extrémité de la colonne de mercure, et l'instrument étant disposé horizontalement, lorsque la température s'élève, le mercure qui est dans le tube se dilate et pousse devant lui l'index. Celui-ci s'arrête aussitôt que le mercure cesse de se dilater, mais il demeure au même point de la tige, lorsque le mercure se

contracte, car il n'y a pas adhérence entre ce liquide et le fer. Le point où s'arrête l'index marque donc la plus haute température qui s'est produite; sur le dessin ci-dessus, l'index indique près de 31 degrés.

Fig. 162. (h = 26).

Le thermomètre inférieur est à minima; le liquide qu'il contient est de l'alcool dans lequel plonge entièrement un petit cylindre d'émail B, destiné à servir d'index. Si la température baisse tandis que le cylindre est à l'extrémité de la colonne liquide, celle-ci, en se contractant, l'entraîne avec elle par un effet d'adhésion, et l'index avance ainsi jusqu'au point où a lieu le maximum de contraction du liquide. Lorsque la température s'élève, l'alcool se dilate, passe entre la paroi du tube et l'index, sans que celui-ci se déplace. Par conséquent, l'extrémité de l'index opposée au réservoir indique la plus basse température à laquelle a été portée l'instrument; 9° ½ au-dessous de zéro dans le dessin ci-dessus.

* 245. **Thermomètre à maxima de M. Walferdin.** — Le thermomètre à maxima de M. Walferdin est un thermomètre à déversement. Cet instrument a la forme d'un thermomètre à mercure ordinaire. Seulement, à la partie supérieure, il est terminé par un petit réservoir, ou *panse* dans laquelle pénètre la tige, qui se termine en pointe effilée et ouverte (fig. 163). Dans cette panse est du mercure destiné à *amorcer* l'instrument, c'est-à-dire à remplir la tige complétement à chaque observation. Pour cela, on chauffe le réservoir inférieur jusqu'à ce que le mercure, se dilatant, commence à sortir par la pointe effilée qui termine la tige. Retournant alors l'instrument, le mercure qui est dans la panse descend vers la pointe, et celle-ci se trouve y plonger en entier. On laisse ensuite le thermomètre se refroidir lentement, en ayant soin de le tenir toujours renversé. Par le refroidissement, le mercure du réservoir se contracte, une certaine quantité passe, par un effet de cohésion, de la panse dans la tige, et celle-ci se trouve complétement remplie.

Lorsqu'on doit faire usage de cet instrument, on commence par l'amorcer à une température inférieure à celle qu'il s'agit d'observer, puis on le place dans le lieu dont on veut connaître le maximum de température. Si le thermomètre vient d'abord à se refroidir, il n'y a aucun inconvénient, puisqu'il n'entre ni ne sort du

mercure. Mais si la température s'élève, le mercure se dilate, une partie se déverse dans la panse sans pouvoir rentrer dans le thermomètre, parce qu'alors celui-ci est dans la position représentée dans la figure ci-contre. Pour déterminer ensuite la plus haute température à laquelle l'instrument a été porté, il suffit de le comparer à un thermomètre étalon, en les chauffant tous les deux graduellement dans un bain jusqu'à ce que le mercure, dans le thermomètre à déversement, remonte au sommet de la tige et soit près de sortir. Consultant alors le thermomètre étalon, la température qu'il indique est la plus haute à laquelle a été porté le thermomètre à maxima.

M. Walferdin a aussi construit un thermomètre à minima ; il est encore à déversement, mais à deux liquides et d'un usage moins facile que le précédent. Ces thermomètres sont surtout utilisés pour prendre les plus hautes ou les plus basses températures du fond des lacs, des mers ou des puits. Toutefois, il faut alors les renfermer dans un tube de verre qu'on soude ensuite à la lampe, afin de les soustraire à la pression extérieure qui diminuerait le volume du réservoir et en ferait sortir un excès de mercure.

246. Pyromètre de Wedgwood. — On appelle *pyromètres* des

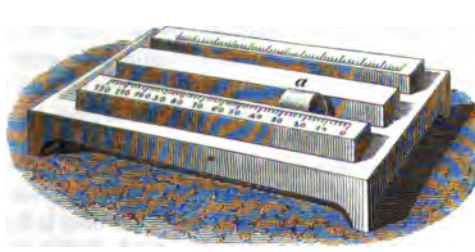


Fig. 164 (1 = 21).

instruments destinés à mesurer les hautes températures pour lesquelles le thermomètre à mercure ne saurait être employé, parce que ce liquide serait vaporisé et le verre fondu. On n'a pas de bons pyromètres ; tous ceux qu'on a construits jusqu'ici sont loin de donner la mesure exacte des températures.

Wedgwood, fabricant de poterie en Angleterre, adopta un pyromètre fondé sur le retrait qu'éprouve l'argile par l'action de la chaleur. Cet instrument est formé d'une plaque de cuivre sur laquelle sont fixées trois barres de même métal (fig. 164). La longueur de

chacune est d'un demi-pied anglais. Les deux premières, distantes d'abord de 6 lignes anglaises, convergent d'une ligne d'une extrémité à l'autre. La seconde et la troisième, dont l'écartement fait suite à celui des deux premières, convergent aussi d'une ligne. En sorte que la longueur totale de la *jauge* est d'un pied, et la convergence, d'un bout à l'autre, de deux lignes.

Chaque pouce de la jauge est divisé en 20 degrés, ce qui donne 240 degrés sur la longueur totale. Pour faire usage de cet instrument, on a de petits cylindres d'argile séchés dans une étuve à 100 degrés, et d'un diamètre tel qu'à la température ordinaire ils entrent dans la jauge juste au zéro de l'échelle. Portés à une température élevée, dans un four, les cylindres éprouvent un retrait qui provient d'un commencement de vitrification; refroidis et mis dans la jauge, à cause du retrait, ils entrent au delà du zéro, et le point où ils s'arrêtent indique, en degrés de pyromètre, la température du four dans lequel ils ont été placés. Dans la figure ci-dessus, le cylindre *a* marque 32 degrés.

Wedgwood a évalué approximativement, en admettant que le zéro de son pyromètre corresponde déjà à 500 degrés centigrades, que chaque degré de cet instrument en vaut 72. C'est-à-dire que, pour convertir en degrés centigrades une température donnée en degrés du pyromètre, il faut multiplier ceux-ci par 72 et ajouter 500 au produit. Mais, outre que ces évaluations ne sont pas précises, les cylindres ne pouvant être tous d'une argile identique, leur retrait n'est pas le même, et leurs indications ne sont pas comparables.

247. **Pyromètre de Brongniart.** — Brongniart avait fait construire, pour les fours de la fabrique de Sèvres, un pyromètre qui a beaucoup de rapport avec l'appareil représenté dans la figure 152. Il consiste en une barre d'acier ou de platine placée dans une rigole pratiquée sur une plaque de porcelaine. D'un bout, la barre butte contre le fond de la rigole; de l'autre, elle est en contact avec une tige de porcelaine qui sort à l'extérieur du four où est placé l'appareil. Enfin, cette dernière tige s'appuie sur le petit bras d'un levier coudé dont la grande branche se meut sur un arc de cercle gradué; à mesure que la barre métallique, placée dans le four, s'allonge par l'élévation de température, elle pousse la tige de porcelaine, et celle-ci fait marcher le levier coudé. Ce pyromètre, qui était abandonné à Sèvres, même du vivant de son auteur, ne peut servir à déterminer avec précision les températures; cependant il est plus exact que celui de Wedgwood.

* 248. **Thermométrographe.** — Les thermomètres à maxima et à minima ne font connaître, à chaque observation, que les températures extrêmes, sans laisser de trace des températures intermédiaires. Le thermomètre à hélice de Bréguet (fig. 161) a été modifié par M. Bréguet neveu, de manière à indiquer les températures d'heure en heure. Pour cela, l'aiguille porte un petit stylet rempli d'encre, et au-dessous est une plaque mobile sur laquelle sont tracés 24 arcs égaux et équidistants, portant la même graduation centigrade que le cadran du thermomètre. A chaque heure, un mouvement d'horlogerie fait avancer la plaque d'une quantité égale à l'intervalle de deux arcs, et, en même temps, frappe un petit coup sur le stylet de l'aiguille, qui marque un point noir sur l'arc. Le numéro de l'arc indique l'heure, et la position du point noir donne la température correspondante.

CHAPITRE II

DILATATION DES SOLIDES.

249. **Dilatation linéaire et dilatation cubique; coefficients de dilatation.** — On a déjà vu (228) qu'on distingue, dans les corps solides, deux sortes de dilatation : la *dilatation linéaire*, c'est-à-dire suivant une seule dimension, et la *dilatation cubique*, c'est-à-dire en volume.

On nomme *coefficient de dilatation linéaire* l'allongement que prend l'unité de longueur d'un corps lorsque sa température s'élève de zéro à 1 degré, et *coefficient de dilatation cubique* l'accroissement que prend, dans le même cas, l'unité de volume.

Ces coefficients varient d'un corps à l'autre; mais, pour un même corps, il existe entre eux cette relation simple, que le *coefficient de dilatation cubique est triple du coefficient de dilatation linéaire.* On peut donc, en multipliant ou en divisant par 3, trouver l'un de ces coefficients lorsque l'autre est connu.

Pour démontrer que le coefficient de dilatation cubique est triple du coefficient de dilatation linéaire, soit un cube dont le côté égale 1 à zéro. Si l'on représente par k l'allongement que prend ce côté en passant de zéro à 1 degré, sa longueur à 1 degré sera $1 + k$, et le volume du cube, qui était 1 à zéro, sera actuellement $(1 + k)^3$, c'est-à-dire $1 + 3k + 3k^2 + k^3$. Or, l'allongement k étant toujours une fraction très-petite (page 232, tableau), son carré k^2 et son cube k^3 sont des fractions assez petites pour ne pas influer sur la dernière décimale des nombres qui représentent les coefficients de

dilatation cubique. On peut donc négliger les quantités k^2 et k^3, et le volume à 1 degré devient très-approximativement $1 + 3k$. L'accroissement de volume est donc $3k$, c'est-à-dire triple du coefficient de dilatation linéaire.

250. **Mesure des coefficients de dilatation linéaire.** — Lavoisier et Laplace ont déterminé les coefficients de dilatation linéaire des métaux au moyen de l'appareil représenté dans la figure 165. Il se

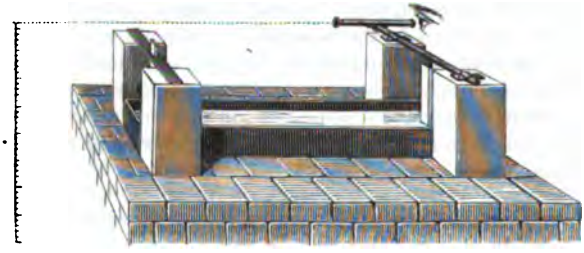


Fig. 165.

compose d'une cuve de cuivre placée sur un fourneau, entre quatre bâtis en pierre. Les deux qui occupent la droite du dessin supportent un axe horizontal à l'extrémité duquel est une lunette ; au milieu de cet axe est fixée une règle de verre, qui tourne avec lui, ainsi que la lunette. Dans les deux autres massifs sont scellées deux traverses

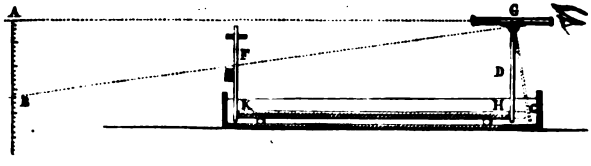


Fig. 166.

de fer qui maintiennent une seconde règle de verre. Enfin, dans la cuve est un bain d'eau ou d'huile où se place la barre dont on veut mesurer le coefficient de dilatation.

La figure 169 représente une coupe de l'appareil ; G est la lunette, KH la barre, dont les bouts s'appuient contre les deux règles de verre F et D. Comme la règle F est fixe, la barre ne peut s'allonger que dans la direction KH, et pour qu'elle ne soit pas gênée dans son mouvement, elle repose sur deux rouleaux de verre.

La barre KH ayant été mesurée avec soin à zéro et placée comme le montre le dessin, c'est-à-dire en contact avec les deux règles, et la lunette étant horizontale, on regarde à quelle division celle-ci correspond sur une échelle verticale AB, placée à une grande distance. Puis on remplace la barre KH par une seconde barre plus longue d'une quantité connue, de 3 millimètres par exemple. La règle D, déplacée maintenant suivant GC, imprime à l'axe de la lunette un mouvement de rotation, et fait prendre à celle-ci une direction oblique GB. En regardant alors à travers la lunette, on lit, sur l'échelle, une déviation AB, que nous supposerons de 180 divisions. Ce résultat obtenu, on retire la seconde barre pour remettre la première, et on chauffe le fourneau, après avoir rempli la cuve d'huile, ce liquide pouvant être porté à une température beaucoup plus élevée que l'eau. A mesure qu'on chauffe, la barre s'allonge et la lunette s'incline de nouveau. On mesure alors le nombre de divisions qu'elle indique sur l'échelle, 120, par exemple; et, en même temps, on observe la température du bain au moyen d'un thermomètre.

De ces données, il est facile de calculer l'allongement de la barre. Pour cela, il faut observer que cet allongement est proportionnel au nombre de divisions indiqué par la lunette sur l'échelle. En effet, les deux triangles GHC et GAB ayant leurs côtés perpendiculaires chacun à chacun, dans toutes les positions de la lunette, ils sont semblables, et on a l'égalité $\frac{HC}{AB} = \frac{HG}{AG}$ [1]; mais si on appelle HC′ un autre allongement, et AB′ la déviation correspondante, on aura de même $\frac{HC'}{AB'} = \frac{HG}{AG}$ [2]. Des égalités [1] et [2], on tire $\frac{HC}{AB} = \frac{HC'}{AB'}$; or, cette dernière égalité peut s'écrire sous la forme $\frac{HC}{HC'} = \frac{AB}{AB'}$, ce qui démontre le principe énoncé.

Cela posé, dans l'expérience ci-dessus, les déviations ayant été 180 et 120, et les allongements correspondants 3 et HC, on a donc $\frac{HC}{3} = \frac{120}{180}$, d'où $HC = \frac{120 \times 3}{180} = 2$ millimètres.

L'allongement HC une fois connu, on obtient le coefficient de dilatation linéaire, c'est-à-dire l'allongement qui correspond à un seul degré et à une seule unité de longueur, en divisant l'allongement obtenu par la température du bain et par la longueur, en millimètres, de la barre à zéro, ou, ce qui est la même chose, par

le produit de ces deux quantités. Par exemple, dans l'expérience ci-dessus, si on suppose que la longueur de la barre, à la température zéro, soit de 893 millimètres, et que le bain ait été porté à 80 degrés, il faut diviser 2 par le produit de 893 par 80, ce qui donne 0,000028 pour le coefficient cherché.

L'expérience montre que le coefficient de dilatation linéaire des métaux est sensiblement constant entre zéro et 100 degrés, c'est-à-dire que, pour un même nombre de degrés, la longueur augmente constamment de la même fraction de ce qu'elle était à zéro. Mais d'après les recherches de Dulong et Petit, le coefficient devient plus grand entre 100 et 200 degrés, et croît encore entre 200 et 300 degrés, et ainsi de suite jusqu'au point de fusion. L'acier trempé fait exception : son coefficient décroît lorsque la température dépasse une certaine limite.

Coefficients de dilatation linéaire, entre zéro et 100 degrés, des corps les plus employés dans les arts.

Verre	0,000008613	Cuivre rouge	0,000017182
Platine	0,000008842	Bronze	0,000018167
Acier non trempé	0,000010788	Cuivre jaune	0,000018782
Fonte	0,000011250	Argent de coupelle	0,000019097
Fer doux forgé	0,000012204	Étain	0,000021730
Acier trempé	0,000012395	Plomb	0,000028575
Or de départ	0,000014660	Zinc	0,000029417

251. **Formules relatives aux dilatations des solides.** — Soient l la longueur d'une barre à zéro, l' sa longueur à la température t, et k son coefficient de dilatation linéaire. La relation qui existe entre ces diverses quantités s'exprime par les formules suivantes.

L'allongement correspondant à t degrés est t fois k ou kt, pour une seule unité de longueur; d'où il est l fois kt, ou ktl pour l unités. La longueur de la barre, qui était l à zéro, est donc $l + ktl$ à t degrés, d'où

$$l' = l + ktl \quad [1].$$

En mettant l en facteur commun dans le second membre, on tire de cette formule

$$l' = l\,(1 + kt) \quad [2].$$

La formule [2] sert à trouver la longueur l' à t^o, lorsqu'on connaît la longueur l à zéro. En divisant les deux membres par $(1 + kt)$, on en déduit

$$l = \frac{l'}{1 + kt} \quad [3].$$

Cette dernière formule sert à trouver la longueur à zéro, lorsqu'on connaît la longueur l' à t.

Enfin, si dans l'égalité [1] on transpose l dans le premier membre, et si on divise des deux côtés par tl, on trouve

$$k = \frac{l' - l}{tl} \text{ [4].}$$

Cette dernière équation sert à calculer le coefficient de dilatation k.

Si au lieu de considérer les dilatations linéaires, on considère les dilatations cubiques, on trouve des formules analogues à celles qui précèdent. Pour cela, soient V le volume d'un corps à 0, V' son volume à t degrés, et D son coefficient de dilatation cubique, lequel, comme on sait (249), est triple de k; on trouve, par le même raisonnement que ci-dessus, $V' = V(1 + Dt)$ [5], et $V = \frac{V'}{1 + Dt}$ [6], formules qui servent à passer du volume à zéro au volume à t degrés, et réciproquement.

252. Problèmes sur les dilatations. — I. Une barre de fer a $2^m,6$ de long à zéro, quelle sera sa longueur à 80 degrés, le coefficient de dilatation du fer étant 0,0000122?

Ce problème se résout par la formule [2], ci-dessus, en y faisant

$$l = 2^m,6,\ t = 80,\ k = 0,0000122,$$

Ce qui donne

$$l' = 2^m,6\,(1 + 0,0000122 \times 80) = 2^m,6 \times 1,000976 = 2^m,6025.$$

C'est-à-dire que la longueur cherchée est $2^m,6025$; ce qui fait 2 millimètres et demi d'allongement.

II. A 90 degrés, une barre de cuivre a $3^m,4$ de long, quelle sera sa longueur à zéro, le coefficient de dilatation du cuivre étant 0,0000172?

Il faut ici faire usage de la formule [3] du paragraphe précédent, en y faisant $l' = 3^m,4$, $t = 90$, $k = 0,0000172$, d'où l'on déduit

$$l = \frac{3,4}{1 + 0,0000172 \times 90} = \frac{3,4}{1,001548} = 3^m,395.$$

III. Une barre métallique a une longueur l' à t degrés, quelle sera sa longueur L à t' degrés?

Ce problème se résout en cherchant la longueur de la barre à zéro, laquelle est $\frac{l'}{1 + kt}$, d'après la formule [3]; puis de la longueur à zéro on passe à la longueur à t' au moyen de la formule [2], c'est-à-dire en multipliant par $1 + kt'$, ce qui donne enfin pour la longueur cherchée

$$L = \frac{l\,(1 + kt')}{1 + kt}.$$

IV. La densité d'un corps étant d à zéro, calculer sa densité d' à t degrés.

Si l'on représente par 1 le volume du corps à zéro et par D son coefficient de dilatation cubique, le volume à t sera $1 + Dt$; et comme la densité d'un corps est évidemment en raison inverse du volume que prend le corps en se dilatant, on a la proportion inverse

$$\frac{d'}{d} = \frac{1}{1 + Dt}, \text{ d'où } d' = \frac{d}{1 + Dt}.$$

253. **Applications de la dilatation des solides.** — La dilatation des solides offre de nombreuses applications dans les arts. Les grilles des fourneaux, par exemple, ne doivent pas être encastrées trop juste à leurs extrémités, mais libres au moins à l'une, sinon elles arrachent les pierres du foyer en se dilatant. Sur les chemins de fer, si les rails se touchaient, la force de dilatation les courberait de distance en distance, ou briserait leurs coussinets. Lorsqu'on chauffe ou refroidit trop brusquement un vase de verre, il éclate; cela est dû à ce que, le verre étant mauvais conducteur du calorique, les parois s'échauffent inégalement, et, par suite, se dilatent de même, ce qui amène la rupture.

Fig. 167.

254. **Pendule compensateur.** — L'inégale dilatation des divers métaux a reçu une importante application dans le *pendule compensateur*. On nomme ainsi un pendule dans lequel l'allongement de la tige, lorsque la température s'élève, est compensé de manière que la distance entre le centre de suspension et le centre d'oscillation demeure constante (60), ce qui est nécessaire, d'après les lois du pendule (59, 3°), pour que l'isochronisme persiste et pour que le pendule puisse servir de régulateur aux horloges (62). De nombreux systèmes ont été proposés pour compenser les pendules. Celui que représente la figure 167 est généralement adopté.

Dans ce système, la lentille L, au lieu d'être soutenue par une seule tige, l'est par une suite de châssis dont les verges verticales sont alternativement d'acier et de laiton. Dans le dessin ci-dessus, les tiges d'acier sont celles qui sont représentées plus colorées : elles sont au nombre de six, y compris une lame d'acier *b*, qui porte tout le pendule et se courbe à chaque oscillation; les autres, au nombre

de quatre, sont en cuivre jaune. La tige *t*, qui porte la lentille L, est fixée, à sa partie supérieure, à une traverse horizontale; mais, à sa partie inférieure, elle est libre, passant dans deux trous cylindriques pratiqués dans les traverses horizontales inférieures.

Cela posé, de la manière dont les tiges verticales sont liées entre elles par les traverses horizontales, il est facile de voir que l'allongement des tiges d'acier ne peut s'effectuer que de haut en bas, et, au contraire, celui des tiges de cuivre, de bas en haut. Par conséquent, pour que la longueur du pendule reste constante, il suffit que l'allongement des tiges de cuivre relève constamment la lentille juste de la même quantité dont l'allongement des tiges d'acier tend à l'abaisser; résultat qu'on obtient en donnant aux tiges d'acier et de cuivre des longueurs qui soient en raison inverse des coefficients de dilatation de ces métaux.

Il est facile de déterminer, par le calcul, la longueur de chaque système de tiges d'acier et de cuivre pour qu'il y ait compensation. En effet, soient a, a', a'' a''', les longueurs respectives des tiges d'acier b, d, e, i, les seules qu'il soit nécessaire évidemment de considérer; soient de même c, c', celles des tiges de cuivre o, n; et L la longueur du pendule, c'est-à-dire la distance du point de suspension au centre d'oscillation; on a $L = (a + a' + a'' + a''') - (c + c')$ [1].

Mais si l'on représente par K et K' les coefficients de dilatation de l'acier et du cuivre on doit avoir $(a + a' + a'' + a''')\,K = (c + c')\,K'$ [2]. Remplaçant, dans cette dernière égalité, la quantité $(a + a' + a'' + a''')$ par sa valeur tirée de l'égalité [1], il vient $(L + c + c')\,K = (c + c')\,K'$, d'où l'on tire

$$c + c' = \frac{L}{\frac{K'}{K} - 1}.$$

Or, pour le cuivre jaune et l'acier, le rapport $\frac{K'}{K}$ égale sensiblement $\frac{7}{4}$, ce qui donne $c + c' = \frac{4}{3}\,L$, et $a + a' + a'' + a''' = \frac{7}{3}\,L$.

Les pendules des horloges étant ordinairement astreints à battre la seconde, on a, à Paris (60), $L = 9^m,993866$; d'ou $c + c' = 1^m,325155$, et $a + a' + a'' + a''' = 2^m,319021$.

En employant un nombre de tiges d'acier et de cuivre moindre que ci-dessus, le calcul fait voir que la compensation serait impossible.

On arrive encore à compenser l'allongement de la tige des pendules au moyen de *lames compensatrices*. On nomme ainsi deux lames de cuivre et de fer soudées ensemble et fixées à la tige du pendule, comme le montre la figure 168. La lame de cuivre, qui est plus dilatable, est au-dessous de la lame de fer. Cela posé, lorsque la température baisse, la tige du pendule se raccourcit et la lentille se relève; mais alors les lames compensatrices se recourbent, comme le montre

la figure 169, ce qui est dû à ce que le cuivre se contracte plus que le fer. De la sorte, deux boules métalliques, placées à l'extrémité des lames s'abaissent, et si elles ont une masse convenable, il s'établit une compensation entre les points qui se rapprochent du centre

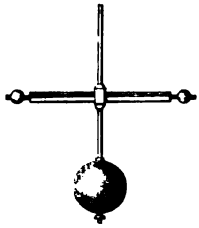


Fig. 168.

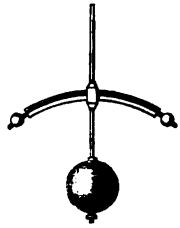


Fig. 169.

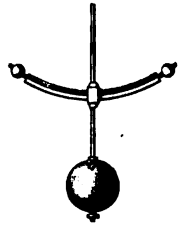


Fig. 170.

de suspension et ceux qui s'en écartent, ce qui fait que le centre d'oscillation n'est pas déplacé. Si la température s'élève, la lentille descend, mais les boules remontent, comme l'indique la figure 170, et il y a encore compensation.

CHAPITRE III

DILATATION DES LIQUIDES.

255. **Dilatation apparente et dilatation absolue.** — Dans les liquides, il n'y a lieu de considérer que des dilatations cubiques, qu'on divise en dilatation absolue et en dilatation apparente. La *dilatation apparente* est l'accroissement de volume que prend un liquide renfermé dans une enveloppe qui se dilate moins que lui. Telle est, dans les thermomètres, la dilatation du mercure et de l'alcool. La *dilatation absolue* est l'augmentation réelle que prend le volume d'un liquide, abstraction faite de toute dilatation de l'enveloppe.

La dilatation apparente est plus petite que la dilatation absolue, de toute celle de l'enveloppe. On rend sensible l'influence de la dilatation de l'enveloppe en plongeant dans l'eau bouillante un thermomètre à gros réservoir, rempli jusqu'à la moitié de sa tige, d'alcool coloré. Au moment où le réservoir entre dans l'eau chaude, l'alcool baisse dans le tube, ce qui provient évidemment de la dila-

tation des parois de l'enveloppe; mais si le réservoir continue à plonger, l'alcool s'échauffe et monte dans le tube d'une quantité égale à sa dilatation absolue, diminuée de celle de l'enveloppe.

De même que pour les solides, on nomme *coefficient de dilatation* d'un liquide, l'accroissement que prend l'unité de volume lorsque la température s'élève de zéro à un degré; mais on distingue alors le *coefficient de dilatation apparente*, et le *coefficient de dilatation absolue*. Plusieurs procédés ont été employés pour déterminer ces deux coefficients de dilatation. Nous ne donnerons que ceux dont ont fait usage Dulong et Petit.

256. Coefficient de dilatation absolue du mercure. — Pour déterminer le coefficient de dilatation absolue du mercure, il fallait éviter l'influence de la

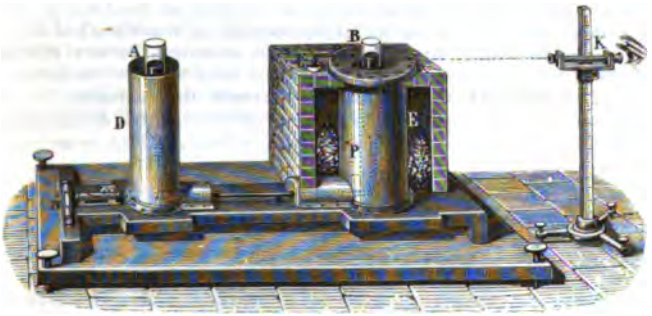


Fig. 171.

dilatation de l'enveloppe; c'est à quoi sont arrivés Dulong et Petit en s'appuyant sur ce principe d'hydrostatique, que, dans deux vases communiquants, les hauteurs de deux liquides qui se font équilibre sont en raison inverse de leurs densités (90), principe qui est indépendant du diamètre des vases, et, par conséquent, de leur dilatation.

L'appareil des deux physiciens se composait de deux tubes de verre A et B [fig. 171], maintenus verticalement sur un support de fer, et réunis par un tube capillaire. Les deux tubes étaient enveloppés chacun d'un manchon métallique dont le plus petit D était rempli de glace pilée, et l'autre E, d'huile qu'on chauffait graduellement au moyen d'un petit fourneau que la figure ci-dessus représente ouvert pour laisser voir le manchon. Enfin, les deux tubes A et B étaient remplis de mercure qui se mettait de niveau quand les tubes étaient à la même température, mais qui s'élevait dans le tube B à mesure qu'on chauffait.

Cela posé, soient h et d la hauteur et la densité du mercure dans la branche A, à la température zéro, et h' et d' les mêmes quantités pour la branche B, à la température t; d'après le principe d'hydrostatique rappelé ci-dessus, on a $h'd' = hd$. Or, $d' = \frac{d}{1 + Dt}$ (252, prob. 4), D étant le coefficient de dilatation absolue du mercure;

remplaçant d' par sa valeur dans l'égalité ci-dessus, on trouve $\frac{h'd}{1+Dt} = hd$, d'où l'on déduit $D = \frac{h'-h}{ht}$.

Cette dernière formule fait trouver le coefficient de dilatation absolue du mercure, lorsqu'on a mesuré les hauteurs h et h' de ce liquide dans les deux tubes, ainsi que la température t du bain où plonge le tube B. Dans l'expérience de Dulong et Petit, cette température était mesurée par un thermomètre à poids P (258) dont le mercure se déversait dans une capsule C. Quant aux hauteurs h' et h, elles se mesuraient au moyen d'un cathétomètre K (69).

Par ce procédé, Dulong et Petit ont trouvé que le coefficient de dilatation absolue du mercure entre zéro et 100 degrés est $\frac{1}{5550}$. Mais ils ont observé que ce coefficient croit avec la température. Entre 100 et 200 degrés, le coefficient moyen est $\frac{1}{5425}$: entre 200 et 300 degrés il égale $\frac{1}{5300}$. Le même phénomène se remarque pour les autres liquides; ce qui fait voir que ces corps ne se dilatent pas régulièrement. On a constaté que leur dilatation est d'autant plus irrégulière qu'ils sont plus près de leur température de congélation ou d'ébullition. Quant au mercure, Dulong et Petit ont constaté que de — 36 à 100 degrés, sa dilatation est très-sensiblement régulière.

257. Coefficient de dilatation apparente du mercure. — Le coefficient de dilatation apparente d'un liquide varie avec la nature de l'enveloppe. Celui du mercure, dans le verre, a été déterminé par Dulong et Petit, au moyen de

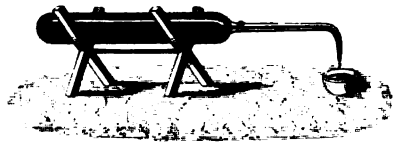


Fig. 172 (l = 20).

l'appareil représenté dans la figure 172. Il se compose d'un réservoir cylindrique de verre auquel est soudé un tube capillaire recourbé à angle droit et ouvert à son extrémité.

Pour faire l'expérience, on pèse l'instrument vide, puis rempli de mercure à zéro; la différence des deux pesées donne le poids P du mercure contenu dans l'appareil. Le portant ensuite à une température connue t, le mercure se dilate et il en sort une certaine quantité qu'on recueille dans une petite capsule et qu'on pèse. Si l'on représente par p le poids du mercure qui est sorti, celui du mercure resté dans l'appareil l'est par $P - p$.

Cela posé, lorsque l'instrument revient à zéro, le mercure se refroidissant, il se produit dans le réservoir un vide qui représente la contraction du poids de mercure $P - p$ de t à 0, ou, ce qui est évidemment la même chose, la dilatation de ce même poids de 0 à t; c'est-à-dire que le poids p représente la dilatation pour t degrés du poids $P - p$. Mais ces deux poids étant considérés à zéro, ils sont proportionnels aux volumes de mercure qui leur correspondent; donc $\frac{p}{(P-p)t}$ est la dilatation du mer-

cure, dans le verre, pour une seule unité de volume et pour un seul degré, c'est-à-dire le coefficient de dilatation apparente. Donc, en représentant par d ce coefficient, on a $d = \frac{p}{(P - p)t}$.

Dulong et Petit ont ainsi trouvé que le coefficient de dilatation apparente du mercure, dans le verre, est $\frac{1}{6480}$.

258. Thermomètre à poids. — L'appareil représenté dans la figure 172 a reçu le nom de *thermomètre à poids*, parce que, du poids du mercure sorti, on peut déduire la température à laquelle l'instrument a été porté. En effet, l'expérience ci-dessus ayant conduit à la formule $\frac{p}{(P - p)t} = \frac{1}{6480}$, on trouve, en faisant disparaître les dénominateurs, $p \times 6480 = (P - p)t$,

$$\text{d'où } t = \frac{p \times 6480}{(P - p)};$$

formule d'où l'on déduit t, lorsque P et p sont connus.

259. Coefficient de dilatation du verre. — La dilatation absolue d'un liquide étant égale à sa dilatation apparente, augmentée de la dilatation de l'enveloppe, on a obtenu le coefficient de dilatation cubique du verre en prenant la différence entre le coefficient de la dilatation absolue du mercure et celui de sa dilatation apparente. C'est-à-dire que le coefficient de dilatation cubique du verre égale

$$\frac{1}{5550} - \frac{1}{6480} = \frac{1}{38700} = 0,00002584.$$

M. Regnault a constaté que le coefficient de dilatation varie avec les différentes espèces de verre, et, en outre, suivant la forme des enveloppes. Pour le verre ordinaire des tubes de chimie, ce savant a trouvé que le coefficient est 0,0000254.

260. Coefficients de dilatation des divers liquides. — Le coefficient de dilatation apparente de tous les liquides peut se déterminer par le procédé du thermomètre à poids (257). Si l'on veut ensuite déterminer le coefficient de dilatation absolue, on augmente le coefficient de dilatation apparente du coefficient du verre, ce qu découle de la relation qui existe entre ces trois coefficients (259).

Dilatation apparente de quelques liquides, de zéro à 100 degrés.

Mercure	0,01543	Essence de térébenthine	0,07.
Eau distillée	0,0466.	Éther sulfurique	0,07.
Eau saturée de sel marin	0,05...	Huiles fixes	0,08.
Acide sulfurique	0,06...	Alcool	0,116
Acide chlorhydrique	0,06...	Acide azotique	0,11.

Ces nombres représentant la dilatation totale de 0 à 100 degrés, il faudrait les diviser par 100 pour obtenir la dilatation pour un seul degré, ou le coefficient de dilatation; mais les résultats ainsi obtenus ne représenteraient pas le coefficient de dilatation moyen des liquides, parce que ces corps se dilatant très-irrégulièrement, leur coefficient va toujours croissant à partir de zéro; il y a exception pour le mercure dont la

dilatation est très-sensiblement régulière de —36 à 100 degrés, et pour l'eau, qui se contracte d'abord et se dilate ensuite, comme on va le voir ci-dessous (262).

261. Correction de la hauteur barométrique. — On a déjà indiqué à l'article *Baromètre* (144) que pour que les indications de cet instrument soient comparables entre elles, en différents lieux et à différentes saisons, il importe de ramener toujours la colonne de mercure à une température constante, qui est celle de la glace fondante. Cette correction se fait par le calcul suivant.

La hauteur du baromètre étant H à t degrés, soit h sa hauteur à zéro. Si l'on représente par d la densité du mercure à zéro, et par d' sa densité à t degrés, on sait (136) que les hauteurs H et h sont en raison inverse des densités d et d', c'est-à-dire qu'on a $\frac{H}{h} = \frac{d}{d'}$ [1]. Mais si l'on représente par 1 le volume de mercure à zéro, son volume à t degrés le sera par $1 + Dt$, D étant le coefficient de dilatation absolue du mercure. Or, on a vu (252), pr. IV) que le rapport des volumes $1 + Dt$ et 1 est égal au rapport inverse des densités d et d', c'est-à-dire qu'on a $\frac{d}{d'} = \frac{1 + Dt}{1}$ [2]. Des égalités [1] et [2] on tire $\frac{H}{h} = \frac{1 + Dt}{1}$; d'où $H = h + hDt$. En remplaçant D par sa valeur $\frac{1}{5550}$, on a

$$H = h + \frac{ht}{5550}; \text{ ou } H = h\left(1 + \frac{t}{5550}\right) = h\left(\frac{5550 + t}{5550}\right);$$

$$\text{d'où } h = \frac{5550 \times H}{5550 + t}.$$

Dans ce calcul, n doit prendre le coefficient de dilatation absolue du mercure, et non le coefficient de dilatation apparente, parce que la valeur de H est la même que si le verre ne se dilatait pas, la hauteur du baromètre étant indépendante du diamètre du tube (83), et, par conséquent, de sa dilatation.

Comme application de la formule ci-dessus, soit proposé, la température étant 25 degrés et la hauteur du baromètre $0^m,75$, de calculer la hauteur à zéro.

$$\text{On a } h = \frac{5550 \times 0^m,75}{5550 + 25} = \frac{4162,1}{5575} = 0^m,746.$$

262. Maximum de densité de l'eau. — L'eau offre ce phénomène remarquable que, lorsque sa température s'abaisse, elle ne se contracte que jusqu'à 4 degrés; au-dessous de ce point, quoique le refroidissement continue, non-seulement la contraction cesse, mais le liquide se dilate jusqu'au point de congélation, qui a lieu à zéro; en sorte qu'à 4 degrés l'eau éprouve un maximum de condensation.

Plusieurs procédés ont servi à déterminer la température du maximum de densité de l'eau. M. Hallstrom, en pesant, dans de l'eau à différentes températures, une boule de verre lestée avec du sable, et en tenant compte de la dilatation du verre, avait trouvé

que c'était dans l'eau à 4°,1, que la boule perdait le plus de son poids; d'où il avait conclu que c'était à cette température qu'avait lieu le maximum de densité.

Mais M. Despretz s'est assuré que c'est à 4 degrés qu'a lieu le maximum de densité de l'eau. Ce savant a fait usage d'un thermomètre à eau, c'est-à-dire contenant de l'eau au lieu de mercure. En le refroidissant graduellement dans un bain dont la température était donnée par un thermomètre à mercure, il a constaté que c'est à 4 degrés que se produit, dans le thermomètre à eau, le maximum de contraction.

CHAPITRE IV

DILATATION ET DENSITÉ DES GAZ.

263. **Méthode de Gay-Lussac; ses lois.** — Les gaz sont les corps les plus dilatables, et en même temps ceux dont la dilatation présente le plus de régularité. De plus, en prenant pour coefficient de dilatation des gaz, de même que pour les solides et les liquides, l'accroissement de l'unité de volume de zéro à 1 degré, on trouve que les coefficients de dilatation des différents gaz ne diffèrent entre eux que de quantités très-petites. Enfin, dans ces corps, il n'y a lieu de considérer que la dilatation cubique.

C'est Gay-Lussac qui, le premier, a mesuré le coefficient de dilatation des gaz, au moyen de l'appareil représenté dans la figure 173. Celui-ci se compose d'une boîte rectangulaire de fer-blanc, de 40 centimètres de longueur environ, et remplie d'eau dont on peut élever la température plus ou moins. Au milieu de l'eau est un thermomètre à air formé d'un réservoir sphérique A et d'une tige capillaire AB. Le tube est d'avance partagé en parties d'égale capacité (231), et on détermine combien le réservoir A contient de ces parties; ce qui s'obtient en pesant l'appareil plein de mercure à zéro, puis en le chauffant légèrement pour faire sortir un peu de mercure. Pesant de nouveau, on a le poids du mercure sorti. En refroidissant à zéro celui qui reste, il se produit, dans le tube AB, un vide qui fait connaître le volume correspondant au poids écoulé. On en déduit ensuite le volume de mercure resté dans l'appareil, et, par suite, le volume du réservoir, par le même calcul qu'on a déjà fait pour déterminer le volume du piézomètre, page 66.

Il restait à remplir d'air sec le réservoir et la tige. Pour cela, on les remplissait d'abord de mercure (232), qu'on faisait bouillir dans le réservoir même pour le dessécher; puis on fixait à l'extrémité de la tige, au moyen d'un bouchon, un tube C rempli de substances desséchantes, de chlorure de calcium, par exemple. On introduisait alors dans la tige AB, à travers le tube C, un fil fin de platine qu'on agitait dans le tube, en inclinant en même temps celui-ci de manière à faire écouler le mercure goutte par goutte, lorsqu'on donnait de légères secousses à l'appareil. L'air rentrait alors bulle à bulle dans le réservoir, mais après s'être desséché sur le chlorure

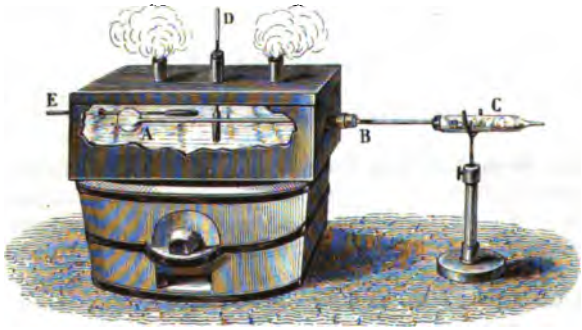


Fig. 173 (l = 40).

de calcium. Enfin, on avait soin de conserver dans la tige AB un petit index de mercure.

Cela posé, le thermomètre à air était disposé dans la cuve rectangulaire de fer-blanc. Celle-ci étant d'abord remplie de glace fondante, l'air se contractait et l'index B marchait vers le réservoir A. On notait le point où il devenait stationnaire, ce qui déterminait le volume d'air à zéro, puisque la capacité du réservoir était connue. On retirait alors la glace pour la remplacer par de l'eau ou de l'huile, et on chauffait la cuve sur un fourneau. L'air du réservoir se dilatait et l'index avançait de A vers B. Notant enfin le point où il s'arrêtait, et, en même temps, la température indiquée par deux thermomètres D et E, on connaissait le volume d'air et sa température.

Si l'on suppose d'abord que la pression atmosphérique n'ait pas varié pendant l'expérience, et si l'on néglige la dilatation du verre,

qui est très-petite, on a la dilatation totale de l'air, dans l'appareil, en retranchant du volume qu'il a pris à la fin de l'expérience celui qu'il avait à zéro. Divisant alors par la température finale, on a la dilatation correspondante à 1 degré, et divisant enfin par le nombre d'unités contenues dans le volume à zéro, on a la dilatation correspondante à un seul degré et à une seule unité de volume, c'est-à-dire le coefficient de dilatation.

On verra dans les problèmes qui suivent (264) comment on doit faire les corrections de pression et de température, si l'on veut avoir égard aux variations de pression atmosphérique et à la dilatation du verre pendant l'expérience.

Avec l'appareil que nous venons de décrire, Gay-Lussac avait trouvé que le coefficient de dilatation de l'air était 0,00375 ; mais, par des méthodes plus précises, on a constaté, depuis, que ce nombre est trop grand et que la vraie valeur du coefficient de dilatation de l'air est 0,00366.

De plus, Gay-Lussac avait donné, sur la dilatation des gaz, les deux lois suivantes, remarquables par leur simplicité :

1° *Tous les gaz ont le même coefficient de dilatation que l'air ;*

2° *Ce coefficient conserve la même valeur quelle que soit la pression supportée par les gaz.*

Mais on va voir, ci-dessous (265), que ces lois ne peuvent être admises d'une manière rigoureuse, et qu'elles n'expriment que d'une manière approchée le phénomène de la dilatation des gaz.

264. Problèmes sur la dilatation des gaz. — I. Le volume d'un gaz à zéro est V ; quel sera son volume à t degrés, le coefficient de dilatation étant α et la pression étant constante ?

Soit V′ le volume cherché ; si l'on répète ici le même raisonnement que pour la dilatation linéaire (251), on trouve sans peine

$$V' = V + \alpha V t, \text{ ou } V' = V(1 + \alpha t) \quad [1].$$

II. Le volume d'un gaz est V′ à t degrés, quel sera son volume V à zéro, la pression restant constante, et le coefficient de dilatation étant α ?

Cette question se résout au moyen de la formule [1] ci-dessus, de laquelle on tire, en divisant les deux membres par $(1 + \alpha t)$,

$$V = \frac{V'}{1 + \alpha t} \quad [2].$$

III. Connaissant le volume V′ d'un gaz à t degrés, calculer son volume V″ à t' degrés, la pression restant la même.

Il faut d'abord réduire le volume à zéro par la formule [2], ce qui donne

$$\frac{V'}{1 + \alpha t}.$$

Puis on ramène ce dernier volume de zéro à t' degrés au moyen de la formule [1], et on a enfin

$$V'' = \frac{V'(1 + \alpha t')}{1 + \alpha t} \quad [3].$$

IV. Le volume d'un gaz, à t degrés et à la pression H, est V'; quel sera le volume V de la même masse de gaz à zéro et sous la pression $0^m,76$?

Il y a à faire ici deux corrections, l'une relative à la température, l'autre à la pression. Il est indifférent de commencer par l'une ou par l'autre. Si l'on fait d'abord la correction de température, le volume à zéro sera, d'après la formule [2], $\frac{V'}{1 + \alpha t}$, mais encore à la pression H. On le ramène de cette pression à la pression $0^m,76$, en posant, d'après la loi de Mariotte (150),

$$V \times 0,76 = \frac{V'}{1 + \alpha t} \times H,$$

$$\text{d'où } V = \frac{HV'}{0,76\,(1 + \alpha t)} \quad [4].$$

Comme application numérique, soit à résoudre la question suivante : étant donnés 8 litres d'air à 25 degrés et à la pression $0^m,74$, quel sera le volume à zéro et à la pression $0^m,76$?

Si l'on fait d'abord la correction de pression, on a $\frac{x}{8} = \frac{74}{76}$;

$$\text{d'où } x = \frac{74 \times 8}{76} = 7 \text{ lit., } 789.$$

Le volume ainsi obtenu est à la pression $0^m,76$, mais encore à 25 degrés; il reste à le ramener à zéro. Pour cela, on fait usage de la formule [2] ci-dessus, ce qui donne, pour le volume cherché,

$$V = \frac{7,789}{1 + 0,00366 \times 25} = \frac{7,789}{1,0915} = 7 \text{ lit., } 136.$$

On pourrait aussi directement faire usage de la formule [4], en remplaçant H, V', α et t par leurs valeurs.

V. Le volume d'un ballon de verre est V' à t degrés; quel sera son volume V à zéro?

Pour résoudre cette question, on admet qu'un ballon de verre se dilate, pour une variation de température déterminée, de la même quantité que se dilaterait une masse de verre pleine et de même volume. Si l'on représente alors par δ le coefficient de dilatation cubique du verre, et par V le volume du ballon à zéro, on aura, de même que dans le problème I ci-dessus,

$$V' = V + \delta V t = V(1 + \delta t),$$

$$\text{d'où } V = \frac{V'}{1 + \delta t}.$$

VI. Un certain volume de gaz à t degrés pèse P'; quel sera le poids du même volume de ce gaz à zéro?

Soit P le poids cherché, α le coefficient de dilatation du gaz, d' sa densité à t degrés, et d sa densité à zéro. Les poids étant proportionnels aux densités, on a l'égalité $\frac{P'}{P} = \frac{d'}{d}$. Si l'on représente par 1 un certain volume du gaz donné à zéro, son volume à t degrés sera $1 + \alpha t$; or, les densités étant en raison inverse des volumes (41), on a $\frac{d'}{d} = \frac{1}{1 + \alpha t}$. Ces deux égalités ayant un membre commun, on en déduit $\frac{P'}{P} = \frac{1}{1 + \alpha t}$ d'où $P = P'(1 + \alpha t)$.

De cette dernière égalité, on tire aussi $P' = \frac{P}{1 + \alpha t}$, formule qui fait trouver le poids à t degrés quand on connaît le poids à zéro.

VII. Calculer le poids P d'azote qui serait contenu, à 32°, dans un ballon de verre dont le volume, à zéro, est 12 lit.,3; le coefficient de dilatation de l'azote étant 0,003668, le coefficient de dilatation linéaire du verre 0,00000861, et le poids spécifique de l'azote 0,9714; on suppose la pression atmosphérique égale à 0m,76.

Soient k le coefficient de dilatation linéaire du verre et V le volume du ballon à zéro, son volume à t degrés sera $V(1 + 3kt)$ (249 et 251). Pour trouver le poids d'azote contenu dans ce ballon, observons qu'un litre d'air à zéro et à la pression 0m,76 pesant 1gr,3, un litre d'azote, à la même température et à la même pression, pèse $1^{gr},3 \times 0,9714$, puisque le nombre 0,9714 est le poids spécifique de l'azote par rapport à l'air; par conséquent, à t degrés, un litre d'azote pèse $\frac{1^{gr},3 \times 0,9714}{1 + \alpha t}$ (prob. VI), α étant le coefficient de dilatation de l'azote. Donc, enfin, le poids demandé est $\frac{1^{gr},3 \times 0,9714}{1 + \alpha t} \times V(1 + 3kt)$. Substituant à la place de V, k, t et α, leurs valeurs, on trouve $P = 14^{gr},025$.

* 265. **Méthode de M. Regnault.** — M. Regnault a successivement fait usage de quatre procédés pour déterminer le coefficient de dilatation des gaz. Dans les uns, la pression était constante et le volume du gaz variable, comme dans le procédé de Gay-Lussac; dans les autres, le volume demeurait le même, mais la pression pouvait varier à volonté. Nous ne décrirons que le premier procédé qu'a employé M. Regnault, le même dont s'étaient déjà servis Dulong et M. Rudberg, et dans lequel la pression est constante. Mais ce qui caractérise les expériences de M. Regnault, ce sont les soins avec lesquels ont été évitées les chances d'erreur. Son appareil se compose d'un réservoir cylindrique B (fig. 174) d'une assez grande capacité, auquel est soudé un tube capillaire recourbé. Afin de remplir ce réservoir d'air parfaitement sec, on le dispose, comme le montre la figure, dans un vase de fer-blanc semblable à celui qui sert à prendre le point 100 des thermomètres; puis, au moyen d'une feuille de caoutchouc, on raccorde la tige capillaire à une suite de tubes en U remplis de substances desséchantes. Ces tubes vont aboutir à une petite pompe à air, au moyen de laquelle on fait le vide dans ces tubes et dans le réservoir, tandis que celui-ci est enveloppé de vapeur d'eau à 100 degrés. On laisse ensuite rentrer l'air lentement, puis on fait le vide de nouveau, et ainsi de suite un grand nombre de fois. De la sorte, on arrive à dessécher complétement l'air qui se trouve dans le réservoir, car l'humidité qui était adhérente aux parois se dégage en vapeur à la température de 100 degrés, et l'air qui rentre, chaque fois qu'on a fait le vide, est desséché à son passage dans les tubes en U.

Cela fait, pendant une demi-heure on laisse prendre à l'air la température de la

vapeur d'eau, puis on enlève les tubes desséchants, et on ferme à la lampe l'extrémité du tube, en ayant soin de noter, en même temps, la hauteur H du baromètre. Le

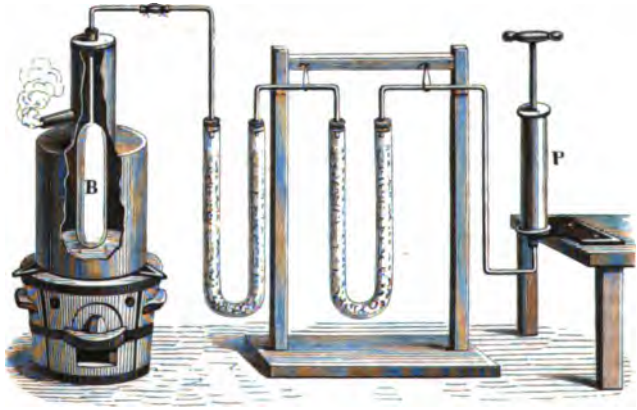


Fig. 174.

réservoir B étant refroidi, on le place dans l'appareil que représente la figure 175. On l'entoure alors complétement de glace pour amener à zéro l'air qu'il contient, et on plonge l'extrémité du tube capillaire dans une cuvette C remplie de mercure. Lorsque le réservoir B est à zéro, on casse avec une petite pince la pointe *b*; l'air intérieur s'étant condensé, le mercure de la cuvette y pénètre par l'effet de la pression atmosphérique, et s'élève à une hauteur CG telle qu'ajoutée à la force élastique de l'air qui reste dans l'appareil, elle fasse équilibre à la pression atmosphérique. Afin de mesurer la hauteur de la colonne GC, que nous représenterons par *h*, on abaisse une tige mobile *go* jusqu'à ce que la pointe *o* affleure à la surface du mercure dans la cuvette, puis on mesure, au cathétomètre, la différence de hauteur entre la pointe *g* et le niveau du mercure en G. Ajoutant à cette différence la longueur de la tige *go*, qui est connue, on a la hauteur *h* de la colonne GC. On ferme enfin avec un peu de cire la pointe *b*, au moyen de la pièce *a*, et on note la pression indiquée par le baromètre. En la représentant par H', la pression, dans le réservoir B, l'est par H' — *h*.

Fig. 175.

Ces mesures prises, on retire le réservoir de la glace, et on le pèse pour obtenir le poids P du mercure qui s'y est introduit. On remplit

ensuite ce réservoir complétement de mercure à zéro, et on détermine le poids P′ du mercure contenu tant dans le réservoir que dans le tube.

Désignant alors par δ le coefficient de dilatation cubique du verre, par α celui de l'air, et par D la densité du mercure à zéro, on détermine α par le calcul suivant. Le volume du réservoir et du tube à zéro est $\frac{P'}{D}$, d'après la formule $P = VD$ (107); par conséquent, à t degrés, ce volume est $\frac{P'}{D}(1 + \delta t)$ (264, prob. v), à la pression H qui avait lieu quand on a fermé à la lampe. Donc, à la pression 76, il est $\frac{P'(1 + \delta t)H}{76D}$ [1] d'après la loi de Mariotte. Or, d'après la formule $P = VD$, le volume de l'air qui reste dans le réservoir est représenté par $\frac{P' - P}{D}$, à zéro et à la pression $H' - h$. Sous la même pression, mais à t degrés, ce volume est donc $\left(\frac{P' - P}{D}\right)(1 + \alpha t)$; et, à la pression 76, il devient $\frac{(P' - P)(1 + \alpha t)(H' - h)}{76D}$ [2]. Or, les volumes représentés par les formules [1] et [2] ne sont autre chose que le volume du réservoir et du tube à t degrés et à la pression 76; ils sont donc égaux. Par conséquent, en supprimant le dénominateur commun, on a l'équation

$$P'(1 + \delta t)H = (P' - P)(1 + \alpha t)(H' - h) \quad [3],$$

d'où l'on déduit la valeur de α.

En opérant ainsi, M. Regnault a trouvé, entre zéro à 100 degrés, et pour des pressions comprises entre 0m,30 et 0m,50, les coefficients suivants pour des variations de température d'un degré :

Air	0,003665
Hydrogène	0,0036678
Azote	0,0036682
Acide sulfureux	0,0036696
Acide chlorhydrique	0,0036812
Cyanogène	0,0036821
Acide carbonique	0,0036896

Ces nombres montrent que les coefficients des gaz ne diffèrent que de quantités très-petites. M. Regnault a constaté, en outre, qu'à une même température la dilatation d'un gaz quelconque est d'autant plus grande qu'il est soumis à une plus forte pression. Enfin, ce savant a observé que les coefficients de dilatation de deux gaz diffèrent d'autant plus que ces deux gaz sont soumis à des pressions plus considérables.

266. Thermomètre à air. — Le *thermomètre à air*, ainsi que son nom l'indique, est fondé sur la dilatation de l'air. Lorsqu'on le destine à mesurer de faibles variations de température, on lui donne la même forme que le tube dont s'est servi Gay-Lussac pour mesurer le coefficient de dilatation des gaz (fig. 173); c'est-à-dire qu'il se compose d'un réservoir de verre auquel est soudée une longue tige capillaire. Le réservoir étant rempli d'air parfaitement desséché, on fait passer dans la tige un index d'acide sulfurique coloré en rouge; puis on gradue l'instrument en degrés centigrades,

en comparant la marche de l'index à celle d'un thermomètre à mercure. Mais l'extrémité de la tige de ce thermomètre doit rester ouverte, sinon, l'air qui est au-dessus de l'index se condensant ou se dilatant en même temps que celui qui est dans le réservoir, l'index demeurerait stationnaire. Il résulte de là que les indications du thermomètre à air sont influencées par la pression atmosphérique, ce qui nécessite une correction à chaque observation.

Lorsqu'il s'agit de mesurer des variations de température un peu considérables, l'accroissement de volume étant alors très-grand, on adopte pour thermomètre à air un tube semblable à celui qui a servi à mesurer le coefficient de dilatation des gaz dans l'appareil de M. Regnault (fig. 174 et 175). Opérant avec ce tube comme dans l'expérience du paragraphe 265, on détermine les quantités P, P', H, H' et h, qui entrent dans l'équation [3], et comme α et δ sont connus, on déduit de cette équation la température t à laquelle le tube a été porté.

D'après les recherches de M. Regnault, le thermomètre à air et le thermomètre à mercure sont sensiblement d'accord jusqu'à 260 degrés; mais, au delà, le mercure se dilate plus vite que l'air.

267. **Densité des gaz.** — La *densité* d'un gaz, ou son *poids spécifique*, est le rapport du poids d'un certain volume de ce gaz à celui d'un même volume d'air, le gaz et l'air étant tous les deux à zéro et à la pression $0^m,76$.

D'après cette définition, pour connaître la densité d'un gaz, il faut chercher le poids d'un certain volume de ce gaz à zéro et à la pression $0^m,76$, puis celui d'un même volume d'air à la même température et à la même pression, et diviser le premier poids par le second. A cet effet, on fait usage d'un ballon de verre de 8 à 10 litres de capacité, dont le col porte un robinet qui peut se visser sur la machine pneumatique. On pèse ce ballon successivement vide, plein d'air et plein du gaz dont on cherche la densité, l'air et le gaz étant desséchés par le même procédé que dans l'appareil représenté dans la figure 174. En soustrayant du poids obtenu dans les deux dernières pesées, celui du ballon vide, on a le poids de l'air et le poids du gaz sous le même volume. Dans le cas où, durant ces différentes pesées, la température aurait été constamment zéro, et la pression $0^m,76$, il n'y aurait qu'à diviser le poids du gaz par le poids de l'air, et le quotient serait la densité cherchée. Mais le procédé que nous venons de faire connaître nécessite, en général, de nombreuses corrections pour ramener les deux gaz à zéro et à la pression $0^m,76$, ainsi que pour réduire à zéro le volume du ballon.

Pour faire ces corrections, on doit d'abord avoir soin d'opérer sur des gaz secs, ce qu'on obtient en les faisant passer sur des matières desséchantes avant de les introduire dans le ballon. L'air doit en outre passer sur de la potasse caustique pour perdre l'acide carbonique qu'il contient. De plus, comme les meilleures machines pneumatiques ne font jamais le vide parfait, afin de ne pas tenir compte dans les pesées du gaz qui reste dans le ballon, on fera le vide à chaque fois jusqu'à ce que l'éprouvette marque la même tension e.

Cela posé, on fait le vide dans le ballon, puis on y laisse rentrer de l'air sec; et ainsi de suite plusieurs fois jusqu'à ce que le ballon soit parfaitement desséché. Faisant alors le vide une dernière fois jusqu'à ce que l'éprouvette marque la tension e, on pèse et on a le poids p du ballon vide. On laisse alors rentrer l'air lentement à travers des tubes contenant, les uns du chlorure de calcium, les autres de la potasse; on pèse de nouveau et on trouve que le poids du ballon plein est P. En appelant H la hauteur barométrique et t la température au moment de la pesée, $P - p$ est donc le poids de l'air contenu dans le ballon à la température t et à la pression $H - e$.

Pour ramener ce poids à la pression 760 et à la température 0, soient α le coefficient de dilatation de l'air et δ le coefficient de dilatation cubique du verre. D'après la loi de Mariotte, le poids, qui est $P - p$ à la pression $H - e$, sera, à la pression 760, $(P - p)\,\frac{760}{H - e}$, la température étant toujours t. Or, si celle-ci devient 0, la capacité du ballon diminue dans le rapport $(1 + \delta t)$ à 1, tandis que le poids du gaz augmente dans le rapport de 1 à $(1 + \alpha t)$, ainsi que cela découle des problèmes v et vi (264). Donc le poids de l'air contenu dans le ballon à 0 et à la pression 760, est

$$(P - p) \cdot \frac{760}{H - e} \cdot \frac{1 + \alpha t}{1 + \delta t} \quad [1].$$

Soient de même α' le coefficient de dilatation du gaz dont on cherche la densité, P' le poids du ballon plein de ce gaz, à la température t' et à la pression barométrique H', et enfin p' le poids du ballon vide quand on en a retiré le gaz jusqu'à la tension e; le poids du gaz contenu dans le ballon, à la pression 760 et à la température 0, sera représenté par

$$(P' - p') \frac{760}{H' - e} \cdot \frac{1 + \alpha' t'}{1 + \delta t'} \quad [2].$$

Divisant la formule [2] par la formule [1], on a donc pour la densité cherchée

$$D = \frac{(P' - p')\,(H - e)\,(1 + \alpha' t')\,(1 + \delta t)}{(P - p)\,(H' - e)\,(1 + \alpha t)\,(1 + \delta t')}.$$

Si la température et la pression ne varient pas pendant l'expérience, on a $D = \frac{(P' - p')\,(1 + \alpha' t)}{(P - p)\,(1 + \alpha t)}$; et si enfin on suppose $\alpha = \alpha'$, il vient $D = \frac{P' - p'}{P - p}$.

268. Méthode de M. Regnault pour trouver la densité des gaz. — M. Regnault a apporté au procédé qui précède des modifications qui dispensent d'une partie des corrections. Pour cela, le ballon qui sert à peser les gaz étant suspendu au plateau d'une balance, on lui fait équilibre avec un second ballon de même volume et her-

métiquement fermé, qu'on suspend à l'autre plateau. Ces deux ballons, se dilatant ensemble, déplacent toujours la même quantité d'air; d'où les variations de pression et de température de l'atmosphère deviennent sans influence sur les pesées. Enfin, lorsqu'on remplit le premier ballon d'air et du gaz dont on cherche la densité, on le place dans un vase de zinc entouré de glace. De la sorte, il se trouve à la température de la glace fondante, et en ayant soin de ne fermer le robinet que lorsque le gaz introduit est lui-même à zéro, on évite les corrections de température. Il ne reste qu'à ramener les poids des deux gaz à la même pression $0^m,76$, en se fondant sur ce que ces poids sont proportionnels aux pressions.

269. **Densité des gaz qui attaquent le cuivre.** — Pour les gaz qui attaquent le cuivre, comme le chlore, par exemple, on ne peut se servir d'un ballon à robinet. On fait alors usage d'un flacon à l'émeri, dans lequel on fait arriver le gaz par un tube recourbé qui plonge jusqu'au fond du flacon, en ayant soin de tenir celui-ci droit ou renversé, selon que le gaz qu'on y introduit est plus lourd ou plus léger que l'air. Lorsqu'on juge que tout l'air est expulsé, on retire le tube et on ferme le flacon. Pesant alors ce dernier plein de gaz, le poids qu'on obtient comprend le poids du flacon, plus celui du gaz, moins le poids de l'air déplacé (160). Or, le poids du flacon est facile à déterminer, et si on le jauge, en cherchant le volume d'eau qu'il contient, on en déduit son volume, et par suite le poids de l'air qu'il déplace. Par conséquent, si du poids obtenu en pesant le flacon plein de gaz, on retranche le poids du flacon et qu'on ajoute celui de l'air déplacé, on a le poids cherché. Il ne reste donc plus qu'à diviser le poids du gaz par celui de l'air, en ayant soin, toutefois, de faire les corrections de température et de pression nécessaires pour ramener les deux poids au même volume, à la même température et à la même pression.

Densités des gaz à zéro et à la pression $0^m,76$, *celle de l'air étant prise pour unité.*

Air	1,0000	Acide sulfhydrique	1,1912
Hydrogène	0,0692	Acide chlorhydrique	1,254.
Hydrogène protocarboné	0,559.	Protoxyde d'azote	1,527.
Gaz ammoniac	0,5367	Acide carbonique	1,5290
Oxyde de carbone	0,967.	Cyanogène	1,86..
Azote	0,9714	Acide sulfureux	2,2474
Bioxyde d'azote	1,036.	Chlore	3,44..
Oxygène	1,1056	Acide iodhydrique	4,443.

CHAPITRE V

CHANGEMENTS D'ÉTAT, VAPEURS.

270. **Fusion, ses lois.** — Des divers phénomènes que présentent les corps sous l'influence du calorique, il n'a été question jusqu'ici que de leur dilatation. Or, en ne considérant d'abord que les solides, il est facile de reconnaître que cette dilatation a une limite. En effet, à mesure qu'un corps absorbe une plus grande quantité de calorique, la force répulsive que celui-ci exerce entre les molécules augmente, et il vient un moment où l'attraction moléculaire est insuffisante pour maintenir le corps à l'état solide. Un nouveau phénomène se produit alors : il y a *fusion*, c'est-à-dire passage de l'état solide à l'état liquide par l'influence de la chaleur.

Toutefois, un grand nombre de substances, comme le papier, le bois, la laine, certains sels, ne fondent pas sous l'action d'une température élevée, mais sont décomposés. De tous les corps simples, un seul n'a pu être fondu jusqu'ici par l'action des sources de chaleur les plus intenses, c'est le carbone. Cependant, en le soumettant à l'action d'un courant électrique très-puissant, M. Despretz est parvenu à ramollir ce corps jusqu'à le rendre flexible, ce qui indique un état voisin de la fusion.

L'expérience fait voir que la fusion des corps est constamment soumise aux deux lois suivantes :

1° *Tout corps entre en fusion à une température déterminée, invariable pour chaque substance, si la pression est constante.*

2° *Quelle que soit l'intensité de la source de chaleur, du moment où la fusion commence, la température cesse de s'élever et reste constante jusqu'à ce que la fusion soit complète.*

Températures de fusion de diverses substances.

Mercure	— 40°	Sodium	90°
Glace	0	Alliage de d'Arcet (1 plomb, 1 étain, 4 bismuth)	94
Suif	33	Soufre	111
Phosphore	44	Étain	228
Potassium	55	Bismuth	264
Acide margarique	57	Plomb	335
Stéarine	60	Antimoine	450
Cire blanche	65	Zinc	500
Acide stéarique	70		

M. Hopkins, en Angleterre, a récemment constaté par l'expérience que la température de fusion s'élève d'une manière sensible à mesure que la pression augmente. Les corps sur lesquels il a expérimenté sont le soufre, la cire, la stéarine et le spermacéti.

271. **Calorique latent.** — Lors du passage d'un corps de l'état solide à l'état liquide, la température restant constante pendant toute la durée de la fusion (270, 2°), quelle que soit l'intensité du foyer, on doit en conclure que pour changer d'état, les corps absorbent une quantité de chaleur considérable, dont l'unique effet est de les maintenir à l'état liquide. Cette quantité de chaleur, qui n'agit pas sur le thermomètre, et qui se combine en quelque sorte aux molécules des corps, se désigne sous le nom de *calorique latent* ou *calorique de fusion.*

L'expérience suivante est propre à donner une idée exacte de ce qu'il faut entendre par calorique latent : si l'on mélange d'abord 1 kilogramme d'eau à zéro avec le même poids d'eau à 79 degrés, on a immédiatement 2 kilogrammes d'eau à 39 $\frac{1}{2}$, c'est-à-dire à une température moyenne entre celle des deux liquides mélangés, ce qu'il était facile de prévoir, puisque tous les deux étaient de même nature et en quantité égale. Mais si l'on mélange 1 kilogramme de glace pilée avec un égal poids d'eau à 79 degrés, la glace se fond aussitôt et on obtient 2 kilogrammes d'eau à zéro. On voit par là que, sans changer de température et uniquement pour se fondre, 1 kilogramme de glace absorbe la quantité de chaleur nécessaire pour élever de zéro à 79 degrés 1 kilogramme d'eau. Cette quantité de chaleur représente donc le calorique de fusion de la glace, ou le calorique latent de l'eau.

Chaque liquide a un calorique latent particulier; on verra bientôt comment on le détermine par l'expérience.

272. **Dissolution.** — Un corps se *dissout* lorsqu'il se liquéfie par l'effet de l'affinité qui s'exerce entre ses molécules et celles d'un liquide. La gomme arabique, le sucre, la plupart des sels, se dissolvent dans l'eau.

Pendant la dissolution, de même que pendant la fusion, il y a absorption d'une quantité plus ou moins considérable de calorique latent. C'est pourquoi la dissolution d'un sel détermine, en général, un abaissement de température. Cependant, il arrive pour certaines dissolutions que la température ne s'abaisse pas, et même qu'elle s'élève. On s'en rend compte en observant qu'il se produit ici deux effets simultanés et contraires. Le premier est le passage de l'état solide à l'état liquide, effet qui entraîne un abaissement de tempé-

rature; le second est la combinaison du corps dissous avec le liquide. Or, toute combinaison chimique se fait avec dégagement de chaleur. Par conséquent, suivant que c'est l'un des deux effets qui prédomine, ou suivant qu'ils sont égaux, il y a production de froid ou de chaleur; ou bien, la température reste constante.

273. **Solidification; ses lois.** — La *solidification* ou *congélation* est le passage de l'état liquide à l'état solide. Ce phénomène est toujours soumis aux deux lois suivantes, qui sont les réciproques de celles de la fusion, et qui se constatent par l'expérience:

1° *La solidification se produit, pour chaque corps, à une température fixe, qui est précisément celle de sa fusion;*

2° *Du moment où la solidification commence, jusqu'à ce qu'elle soit complète, la température du liquide reste constante.*

Cette seconde loi résulte de ce que le calorique latent absorbé pendant la fusion redevient libre au moment de la solidification.

Plusieurs liquides, comme l'alcool, l'éther, ne se solidifient point par les plus grands froids auxquels on ait pu les soumettre. Cependant, par un froid produit à l'aide d'un mélange de protoxyde d'azote liquéfié, d'acide carbonique solide et d'éther, M. Despretz est parvenu à donner à l'alcool une consistance telle que le vase qui le contenait a pu être renversé sans que le liquide s'écoulât.

274. **Cristallisation.** — Généralement, les corps qui passent lentement de l'état liquide à l'état solide, affectent des formes géométriques déterminées, qu'on nomme *cristaux,* telles que celles de tétraèdres, de cubes, de prismes, de rhomboèdres. Si c'est un corps en fusion, comme le soufre, le bismuth, qui se solidifie, on dit que la cristallisation se fait par *voie sèche;* mais si c'est un corps tenu en dissolution dans un liquide, on dit que la cristallisation se fait par *voie humide.* C'est en laissant évaporer lentement les liquides qui tiennent des sels en dissolution, que ceux-ci se cristallisent. La neige, la glace naissante, les sels, nous offrent des exemples de cristallisation.

275. **Formation de la glace.** — L'eau distillée se solidifie à zéro et prend alors le nom de *glace;* mais la congélation ne se produit que lentement, parce que la partie qui se solidifie cède son calorique latent au reste de la masse liquide.

La glace offre ce phénomène remarquable, qu'elle est moins dense que l'eau. On a déjà vu, en effet, que par le refroidissement, l'eau ne se contracte que jusqu'à 4 degrés (262); à partir de ce point jusqu'à zéro, elle se dilate. Or, cet accroissement de volume

persiste et augmente encore au moment de la congélation; et on trouve que le volume de la glace, à zéro, est 1,075 fois celui de l'eau à 4 degrés. Par le fait de cette dilatation, la densité de la glace n'est que 0,930 de celle de l'eau; c'est pourquoi elle flotte à la surface de ce liquide.

L'accroissement de volume que prend la glace en se formant est accompagné d'une force expansive considérable qui fait éclater les vases qui la contiennent. Les pierres gélives qui se délitent après la gelée ne doivent cet effet qu'à l'eau qui a pénétré dans leurs pores et s'y est congelée.

Williams, en Angleterre, pour démontrer la force expansive de la glace, plaça, dans une atmosphère de plusieurs degrés au-dessous de zéro, une bombe remplie d'eau, après en avoir fermé solidement la lumière au moyen d'un tampon de bois. Au moment de la congélation, ce tampon fut lancé avec force à une grande distance, et un bourrelet de glace s'accumula sur les bords de l'orifice.

L'eau n'est pas la seule substance qui éprouve une augmentation de volume en se solidifiant, et qui, par conséquent, soit plus dense à l'état liquide qu'à l'état solide. La fonte de fer, le bismuth, l'antimoine présentent le même phénomène.

276. **Retard de la congélation de l'eau.** — La température de la congélation de l'eau est retardée par les sels ou les autres substances qu'elle tient en dissolution. L'eau de mer, par exemple, ne se solidifie qu'à — 2°,5.

Le point de solidification de l'eau pure peut être reculé de plusieurs degrés, lorsqu'on la prive de l'air qu'elle tient ordinairement en dissolution, et qu'on la maintient à l'abri de toute agitation. En effet, dans un vase entouré d'un mélange réfrigérant et placé sous le récipient de la machine pneumatique, afin que l'air se dégage, l'eau peut descendre jusqu'à — 12 degrés et même au delà sans se solidifier. Mais si alors on imprime à sa masse un léger ébranlement, une partie du liquide se congèle aussitôt, et on observe ce phénomène remarquable, que la masse restée liquide remonte subitement à zéro. Cette élévation de température est due au calorique latent qui devient libre par la formation de la glace.

Une agitation trop rapide peut aussi s'opposer à la congélation des liquides. Il en est encore de même de toute action qui, gênant les molécules dans leur mouvement, ne leur permet pas de se grouper dans les conditions nécessaires à l'état solide. C'est ainsi que M. Despretz a pu refroidir dans des tubes très-capillaires, de l'eau jusqu'à — 20 degrés sans qu'elle se congelât. Cette expérience

peut servir à expliquer comment les plantes, dans de certaines limites, résistent à la gelée; les vaisseaux qui contiennent la séve étant très-capillaires.

277. **Mélanges réfrigérants.** — L'absorption du calorique, à l'état latent, par les corps qui passent de l'état solide à l'état liquide (271), a été utilisée pour produire des froids artificiels plus ou moins intenses. Ce résultat s'obtient en mélangeant des substances qui ont de l'affinité les unes pour les autres, et dont une au moins est solide, telles que de l'eau et un sel, de la glace et un sel, un acide et un sel. L'affinité chimique accélérant alors la fusion, la portion qui se fond enlève au reste du mélange une grande quantité de calorique qui devient latent; d'où résulte un abaissement de température quelquefois très-considérable.

Le tableau suivant indique les proportions et la nature des substances à employer pour obtenir un abaissement de température déterminé.

SUBSTANCES.	PARTIES en poids.	REFROIDISSEMENT.
Sulfate de soude	8	+ 10° à — 17°
Acide chlorhydrique	5	
Glace pilée ou neige	2	+ 10° à — 18°
Sel marin	1	
Sulfate de soude	3	+ 10° à — 19°
Acide azotique étendu	2	
Sulfate de soude	6	+ 10° à — 26°
Azotate d'ammoniaque	5	
Acide azotique étendu	4	
Phosphate de soude	9	+ 10° à — 29°
Acide azotique étendu	4	

Les mélanges réfrigérants sont fréquemment utilisés en chimie, en physique, dans l'industrie et dans l'économie domestique. On fabrique depuis quelques années, sous le nom de *glacière des familles*, un petit appareil pour obtenir de la glace en toutes saisons, au moyen d'une dissolution de sulfate de soude dans l'acide chlorhydrique; 6 kilogrammes de ce sel et 5 d'acide suffisent pour donner 5 à 6 kilogrammes de glace en une heure. L'appareil con-

siste en un cylindre métallique divisé en quatre compartiments concentriques. Au centre est l'eau à congeler; dans le compartiment suivant se place un mélange réfrigérant; le troisième contient encore de l'eau; et enfin, dans le compartiment extérieur est un corps peu conducteur, tel que du coton, destiné à s'opposer à l'absorption du calorique extérieur. Le meilleur moyen d'utiliser un mélange réfrigérant est de ne le former que successivement.

VAPEURS; MESURE DE LEUR TENSION.

278. **Vapeurs.** — On a déjà vu (126) qu'on nomme *vapeurs* des fluides aériformes dans lesquels, par l'absorption du calorique, se transforment un grand nombre de liquides, tels que l'éther, l'alcool, l'eau, le mercure. On appelle liquides *volatils* ceux qui possèdent ainsi la propriété de pouvoir passer à l'état aériforme, et liquides *fixes* ceux qui ne donnent de vapeur à aucune température, telles sont les huiles grasses. Il est des corps solides, comme la glace, l'arsenic, le camphre, et, en général, les matières odorantes, qui donnent immédiatement des vapeurs sans passer par l'état liquide.

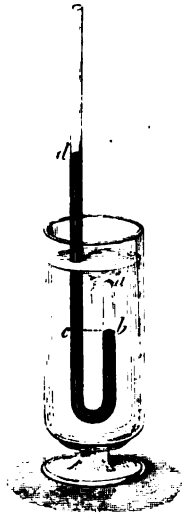


Fig. 176.

Les vapeurs sont transparentes comme les gaz, et généralement incolores; il n'y a qu'un petit nombre de liquides colorés dont les vapeurs soient elles-mêmes colorées.

279. **Vaporisation.** — Le passage d'un corps de l'état liquide à l'état de vapeur se désigne sous le nom général de *vaporisation;* mais on entend spécialement par *évaporation* toute production lente de vapeur à la surface d'un liquide, et par *ébullition* une production rapide de vapeur dans sa masse même. On verra bientôt (289) que, sous la pression ordinaire de l'atmosphère, l'ébullition ne se produit, comme la fusion, qu'à une température déterminée. Il n'en est pas de même de l'évaporation, qui s'opère, pour un même liquide, à des températures très-diverses; cependant, au delà d'un certain refroidissement, toute vaporisation paraît

cesser. Le mercure, par exemple, ne donne plus de vapeur au-dessous de — 10 degrés; l'acide sulfurique, au-dessous de 30.

280. Force élastique des vapeurs. — Comme les gaz, les vapeurs ont une force élastique en vertu de laquelle elles exercent sur les parois des vases qui les contiennent une pression plus ou moins considérable. Pour démontrer la tension des vapeurs, et, en même temps, pour les rendre sensibles à l'œil, on emplit de mercure, à moitié, un tube de verre recourbé en siphon (fig. 176); puis, ayant fait passer une goutte d'éther dans la courte branche, qui est fermée, on plonge le tube dans un bain d'eau à 45 degrés environ.

Fig. 177 (h = 88).

Alors, le mercure s'abaissant lentement dans la petite branche, l'espace *ab* se remplit d'un gaz ayant tout à fait l'apparence de l'air, et dont la force élastique fait évidemment équilibre à la colonne de mercure *cd*, ainsi qu'à la pression atmosphérique qui s'exerce en *d*. Or, ce gaz n'est autre chose que de la vapeur d'éther. Si l'on refroidit l'eau du vase, ou si l'on retire le tube du bain, ce qui produit le même effet, on voit disparaître rapidement la vapeur qui remplit l'espace *ab*, et la goutte d'éther se reformer. Si, au contraire, on chauffe davantage l'eau du bain, le niveau du mercure descend au-dessous du point *b*, ce qui indique un accroissement de tension.

281. Formation des vapeurs dans le vide. — Dans l'expérience précédente, le passage à l'état de vapeur ne s'opère que lentement. Il en est encore de même lorsqu'un liquide volatil est exposé librement à l'air. Dans les deux cas, la pression atmosphérique est un obstacle à la vaporisation; mais il n'en est plus ainsi lorsque les liquides sont placés dans le vide. La force élastique des vapeurs ne rencontrant alors aucune résistance, leur formation est instantanée. Pour le démontrer, on fait plonger plusieurs tubes baromé-

triques dans une même cuvette (fig. 177). Ces tubes étant remplis de mercure, on en conserve un, le tube A, par exemple, pour servir de baromètre, puis on introduit quelques gouttes d'eau, d'alcool et d'éther, respectivement dans les tubes B, C, D. On remarque qu'à l'instant même où, dans chacun de ces tubes, le liquide pénètre dans le vide barométrique, le niveau du mercure s'abaisse, comme le montre la figure. Or, ce n'est pas le poids du liquide introduit qui déprime le mercure, car ce poids n'est qu'une fraction très-petite de celui du mercure déplacé. Il y a donc eu, pour chaque liquide, une production instantanée de vapeur, dont la force élastique a refoulé la colonne mercurielle.

L'expérience ci-dessus montre, en outre, que la dépression du mercure n'est pas la même dans les trois tubes; elle est plus grande dans le tube où est l'alcool que dans celui où est l'eau, et plus grande dans le tube à éther que dans les deux autres. Nous pouvons donc, dès à présent, poser les deux lois suivantes sur la formation des vapeurs :

1° *Dans le vide, tous les liquides volatils se vaporisent instantanément;*

2° *A température égale, les vapeurs de liquides différents ne possèdent pas la même force élastique.*

Par exemple, à 20 degrés, la tension de la vapeur d'éther est à peu près 25 fois plus grande que celle de la vapeur d'eau.

282. Espace saturé; maximum de tension. — Lorsque dans le tube d'un baromètre, on introduit un liquide volatil, tel que de l'éther, si la quantité en est très-petite, il se vaporise instantanément d'une manière complète, et la colonne de mercure n'atteint pas toute la dépression qu'elle est susceptible de prendre; car, si on introduit de nouveau une très-petite quantité d'éther, on voit la dépression augmenter. Or, en continuant ainsi, il vient un moment où l'éther qui pénètre dans le tube cesse de se vaporiser et reste à l'état liquide. Il y a donc, pour une température déterminée, une limite à la quantité de vapeur qui peut se former dans un espace donné. C'est ce qu'on exprime en disant que cet espace est alors *saturé*.

Remarquons, en outre, que du moment où la vaporisation de l'éther cesse, la dépression du mercure s'arrête. Il y a donc aussi une limite à la tension de la vapeur, limite qui, ainsi qu'il sera démontré bientôt (284), varie avec la température, mais qui, pour une température donnée, est *indépendante de la pression*.

Pour faire voir que, dans un espace fermé, saturé de vapeur et

contenant du liquide *en excès*, la température restant constante, il y a un *maximum de tension* que la vapeur ne peut dépasser, quelle que soit la pression, on fait usage d'un tube barométrique plongeant dans une cuvette profonde (fig. 88, page 129). Ayant fait passer dans ce tube, d'abord rempli de mercure, une quantité d'éther suffisante pour qu'après que la chambre barométrique s'est saturée, il reste encore du liquide en excès, on note la hauteur du mercure dans le tube au moyen d'une échelle graduée sur le tube. Or, soit qu'on plonge alors le tube davantage, ce qui tend à comprimer la vapeur, soit qu'on le soulève, ce qui tend à la dilater, la hauteur de la colonne mercurielle reste constante. La tension de la vapeur reste donc la même dans les deux cas, puisque la dépression n'augmente ni ne diminue. On conclut de là que lorsque la vapeur contenue dans un espace saturé est comprimée, une partie retourne à l'état liquide; et que si, au contraire, la pression diminue, une portion du liquide resté en excès se vaporise, et l'espace occupé par la vapeur se sature de nouveau; mais, dans l'un et l'autre cas, la tension et la densité de la vapeur restent constantes.

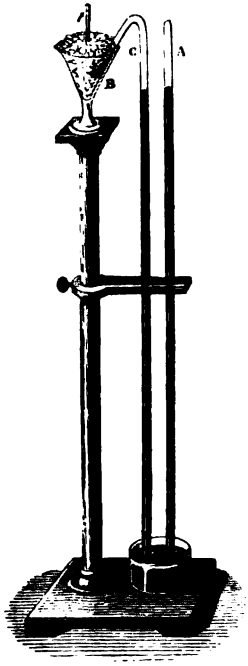


Fig. 178.

Si l'espace où est la vapeur n'est pas saturé, ou s'il ne contient pas de liquide en excès, la vapeur, quand la pression augmente ou diminue, se comporte entièrement comme un gaz, c'est-à-dire que tant qu'elle n'est pas amenée à l'état de saturation, sa tension et sa densité croissent comme la pression (150), d'où l'on conclut que les vapeurs non saturées sont soumises à la loi de Mariotte.

283. **Tension de la vapeur d'eau au-dessous de zéro.** — Pour mesurer la force élastique de la vapeur d'eau au-dessous de zéro, Gay-Lussac s'est servi de deux tubes barométriques remplis de mercure et plongeant dans une même cuvette (fig. 178). L'un

d'eux, qui est droit et parfaitement purgé d'air et d'humidité, sert à mesurer la pression atmosphérique ; l'autre est recourbé de manière qu'une partie de la chambre barométrique plonge dans un mélange réfrigérant (277). Cela posé, si l'on fait passer un peu d'eau dans le tube recourbé, on remarque que le niveau du mercure, dans ce tube, est plus bas que dans le tube A d'une quantité qui varie avec la température du mélange réfrigérant.

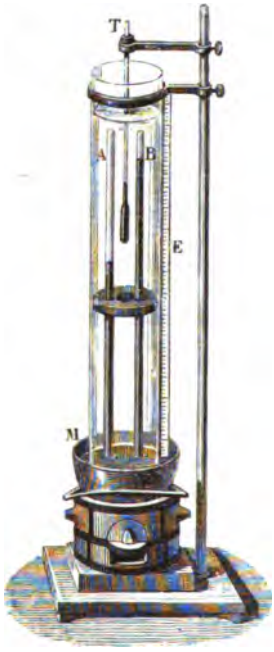


Fig. 179 (h = 1m07)

A 0° la dépress. est, en milltres, 4,06
— 10 ..... 2...
— 20..... 0,84
— 30... 0,36

Ces dépressions, qui sont nécessairement dues à la tension de la vapeur dans la chambre barométrique BC, montrent qu'à des températures très-basses il y a encore de la vapeur d'eau dans l'air.

Dans l'expérience ci-dessus, il est vrai que la partie B et la partie C de la chambre barométrique où est la vapeur ne participent pas toutes les deux à la température du melange réfrigérant; mais on verra bientôt (287) que lorsque deux vases qui communiquent entre eux, sont à des températures inégales, la tension de la vapeur est la même dans tous les deux et correspond toujours à la plus basse des deux températures.

284. **Tension de la vapeur d'eau entre zéro et 100 degrés.** — 1° *Procédé de Dalton.* — Dalton, physicien anglais, mort en 1844, a mesuré la force élastique de la vapeur, de zéro à 100 degrés, au moyen de l'appareil ci-dessus. Deux tubes barométriques A et B (fig. 179) plongent dans une marmite de fonte, pleine de mercure, et placée sur un fourneau. Le baromètre B est complétement purgé d'air et d'humidité, et dans le baromètre A on a fait passer une petite quantité d'eau. Ces deux baromètres sont main-

tenus dans un manchon de verre rempli d'eau, et au centre de ce manchon plonge un thermomètre T, qui donne la température du liquide. En chauffant graduellement la marmite, et, par suite, l'eau du manchon, celle qui est dans le tube A se vaporise, et à mesure que la tension de la vapeur augmente, le mercure s'abaisse. C'est en notant, de degré en degré, sur une échelle E, la dépression qui a lieu dans le tube A, au-dessous du niveau B, que Dalton a le premier construit une table des forces élastiques de la vapeur d'eau de zéro jusqu'à 100 degrés.

2° *Procédé de M. Regnault.* — L'appareil de Dalton offre peu de précision, car le liquide du manchon ne peut être entretenu exactement à la même température dans toute sa hauteur, et dès lors on n'a pas la température précise de la vapeur. M. Regnault a modifié cet appareil en remplaçant le manchon par une caisse de tôle dont le fond porte deux tubulures où les extrémités supérieures des deux tubes A et B s'engagent, maintenues par des feuilles de caoutchouc. Dans la caisse, on met de l'eau chaude, qui recouvre le sommet des tubes, et dont la température a varié, dans l'expérience de M. Regnault, de zéro à 50 degrés. A l'aide d'un agitateur, on mélange constamment les différentes couches du liquide, afin d'obtenir une température uniforme pour toutes les parties du bain dans lequel sont placés les deux tubes barométriques. Enfin, une glace de verre, encastrée dans les parois de la caisse, permet d'observer la différence de niveau du mercure dans les deux tubes. Au moyen de cet appareil, on a pu mesurer avec précision la force élastique de la vapeur d'eau de zéro à 50 degrés.

285. **Tension de la vapeur d'eau au-dessus de 100 degrés par Dulong et Arago.** — Deux procédés ont été mis en usage pour mesurer la force élastique de la vapeur d'eau à des températures supérieures à 100 degrés, l'un par Dulong et Arago, en 1830, l'autre, par M. Regnault, en 1844.

La figure 180 représente une coupe verticale de l'appareil dont se servirent Dulong et Arago pour mesurer la force élastique de la vapeur d'eau au-dessus de 100°. Cet appareil consistait en une chaudière *k*, de cuivre rouge, de 80 litres de capacité et à parois très-épaisses. Deux canons de fusil *a*, dont un seul est visible dans notre dessin, plongeaient dans l'eau de la chaudière, aux parois de laquelle ils étaient solidement scellés. Ces canons de fusil, fermés à leur partie inférieure, étaient remplis de mercure dans lequel étaient placés des thermomètres *t* qui faisaient connaître la température de l'eau et de la vapeur dans la chaudière.

La tension de la vapeur se mesurait au moyen d'un manomètre à air comprimé *m*, gradué expérimentalement d'avance et adapté à une cuvette de fonte *d* remplie de mercure. Pour connaître la hauteur du mercure dans la cuvette, celle-ci était en communication, à son sommet et à sa base, avec un tube de cristal *n*, dans lequel le niveau était toujours le même que dans la cuvette. Enfin, un tube de cuivre *i* faisait communiquer la partie supérieure de la cuvette *d* avec un tube vertical *c*, partant directement de la chau-

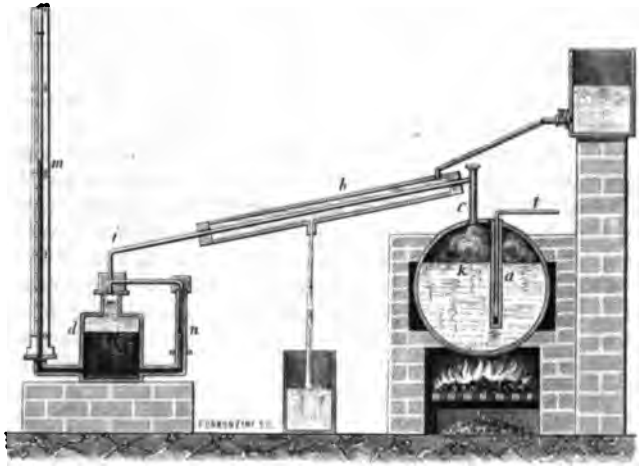


Fig. 180.

dière et donnant issue à la vapeur. Le tube *i* et la partie supérieure de la cuvette *d* étaient remplis d'eau qu'on maintenait constamment à une basse température, en faisant circuler autour du tube un courant d'eau froide, qui s'écoulait d'un réservoir représenté sur la droite du dessin.

Cela posé, la vapeur qui se dégageait du tube *c* exerçait sa pression sur l'eau du tube *i*, cette pression se transmettait à l'eau et au mercure de la cuvette *d*, et le mercure montait dans le manomètre. En prenant, de degré en degré, les températures marquées par les thermomètres, et observant, en même temps, le manomètre, Dulong et Arago ont ainsi mesuré directement la tension de la vapeur d'eau jusqu'à 24 atmosphères. Par le calcul, ils l'ont ensuite évaluée jusqu'à 50.

* 286. **Tension de la vapeur d'eau au-dessus et au-dessous de 100 degrés par M. Regnault.** — On doit à M. Regnault un procédé qui permet de mesurer la tension de la vapeur, soit au-dessous, soit au-dessus de 100 degrés. Ce procédé consiste à faire bouillir

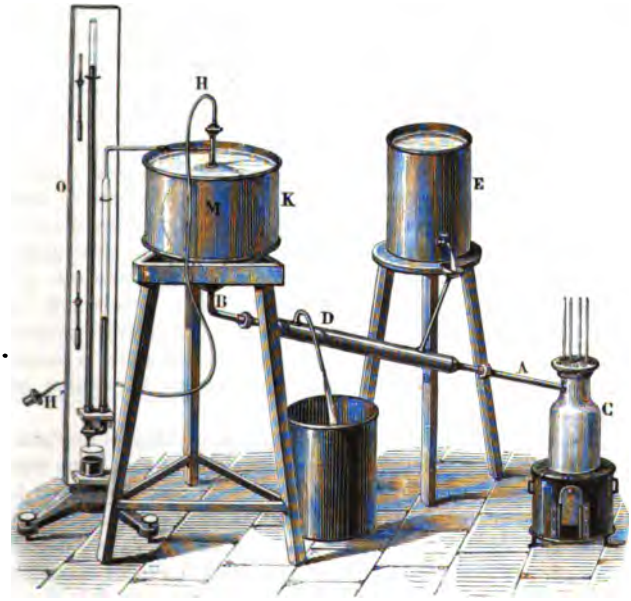


Fig. 181 ($h = 1^m,70$).

de l'eau dans un vase, sous une pression connue, et à mesurer la température à laquelle se produit l'ébullition. En s'appuyant alors sur ce principe, qu'au moment de l'ébullition la force élastique de la vapeur qui se dégage est précisément égale à la pression que supporte le liquide (292), on connaît la tension de la vapeur et la température correspondante, ce qui résout la question.

L'appareil se compose d'un vase de cuivre C (fig. 181) hermétiquement fermé et rempli d'eau jusqu'au tiers environ. Quatre thermomètres traversent le couvercle; deux plongent dans les premières couches du liquide, et les deux autres dans les couches inférieures. Du réservoir C part un tube AB qui va s'adapter au goulot d'un ballon de verre M, de 24 litres de capacité et rempli d'air. Le tube

AB est entouré d'un manchon D, dans lequel circule un courant d'eau froide qui s'écoule d'un réservoir E. De la partie supérieure du ballon M partent deux tubes : l'un communique avec un manomètre à air libre O, voisin de l'appareil ; l'autre tube HH', qui est en plomb, communique avec une machine pneumatique, ou avec une pompe foulante, suivant qu'on veut raréfier l'air qui est dans le ballon ou le comprimer. Enfin, le réservoir K, dans lequel est le ballon, est rempli d'eau à la température ambiante.

Cela posé, supposons qu'il s'agisse d'abord de mesurer la force élastique de la vapeur d'eau au-dessous de 100 degrés. On fixe l'extrémité H' du tuyau de plomb sur la platine d'une machine pneumatique, et au moyen de celle-ci on raréfie l'air dans le ballon M, et, par suite, dans le vase C. Chauffant alors doucement ce vase, l'eau qu'il renferme entre en ébullition à une température d'autant plus basse au-dessous de 100 degrés que l'air a été plus raréfié, c'est-à-dire que la pression qui s'exerce sur le liquide est plus faible. D'ailleurs, les vapeurs se condensant dans le tube AB, qui est refroidi d'une manière constante, la pression indiquée primitivement par le manomètre n'augmente pas, et, par suite, la tension de la vapeur, pendant l'ébullition, reste égale à la pression qui s'exerce sur le liquide.

C'est alors que, consultant d'un côté le manomètre et de l'autre les thermomètres, on détermine la tension de la vapeur à une température connue. Laissant ensuite rentrer un peu d'air dans les tubes et dans la chaudière, afin d'augmenter la pression, on fait une nouvelle observation, et on continue ainsi jusqu'à 100 degrés.

S'il s'agit de mesurer la force élastique de la vapeur au-dessus de 100 degrés, on met l'orifice H' en communication avec une pompe foulante, au moyen de laquelle on soumet l'air du ballon et de la chaudière à des pressions successives supérieures à celle de l'atmosphère. L'ébullition se trouve alors retardée (292), et il suffit d'observer simultanément le manomètre et les thermomètres pour connaître la tension de la vapeur à une température supérieure à 100 degrés.

Les deux tableaux ci-après font connaître la tension de la vapeur d'eau, d'après M. Regnault, de — 30 degrés à 100, puis de 100 à 230. Le premier tableau a été trouvé au moyen de l'appareil qui vient d'être décrit.

Le second a été calculé à l'aide de la formule d'interpolation

$$\log F = a + b\alpha' + c\beta',$$

dans laquelle F représente la force élastique de la vapeur, t sa température, et a, b, c, α, β, des constantes qu'on calcule en commençant par déterminer cinq forces élastiques, c'est-à-dire cinq valeurs de F correspondantes à des températures connues, ce qui donne lieu à autant d'équations que d'inconnues.

Tensions de la vapeur d'eau de — 30 à 100 degrés, d'après M. Regnault.

TEMPÉRATURES.	TENSIONS en millimètres de mercure à zéro.	TEMPÉRATURES.	TENSIONS en millimètres de mercure à zéro.	TEMPÉRATURES.	TENSIONS en millimètres de mercure à zéro.	TEMPÉRATURES.	TENSIONS en millimètres de mercure à zéro.
—30	0,365	5	6,534	40	54,906	75	288,517
—25	0,553	10	9,165	45	71,391	80	354,643
—20	0,841	15	12,699	50	91,982	85	433,011
—15	1,284	20	17,391	55	117,478	90	525,450
—10	1,963	25	23,750	60	148,791	95	663,7[illegible]8
— 5	3,004	30	31,548	65	186,945	100	760,000
0	4,600	35	41,827	70	233,093		

Tensions, en atmosphères, de 100° à 230°,9, d'après M. Regnault.

TEMPÉRATURES.	NOMBRE d'atmosphères.	TEMPÉRATURES.	NOMBRE d'atmosphères.	TEMPÉRATURES.	NOMBRE d'atmosphères.	TEMPÉRATURES.	NOMBRE d'atmosphères.
100,0	1	170,8	8	193,8	15	217,9	22
120,6	2	175,8	9	201,9	16	220,3	23
133,9	3	180,3	10	204,9	17	222,5	24
144,0	4	184,5	11	207,7	18	224,7	25
152,2	5	188,4	12	210,4	19	226,8	26
159,2	6	192,1	13	213,0	20	228,9	27
165,3	7	195,5	14	215,5	21	230,9	28

Ces tables font voir que la force élastique de la vapeur d'eau croît suivant une loi beaucoup plus rapide que la température; mais cette loi n'est pas connue.

L'eau est le seul liquide dont la vapeur, par l'importance de ses applications, ait fixé l'attention des physiciens. La force élastique des vapeurs des autres liquides, à différentes températures, n'a pas été déterminée. On sait seulement que les substances en dissolution, comme les sels, les acides, diminuent, à température égale, la force élastique des vapeurs, et la diminuent d'autant plus que la dissolution est plus concentrée, car l'ébullition n'a lieu alors qu'à une température plus élevée.

287. **Tension dans deux vases communiquants, inégalement chauds.** — Lorsque deux vases fermés, contenant un même liquide,

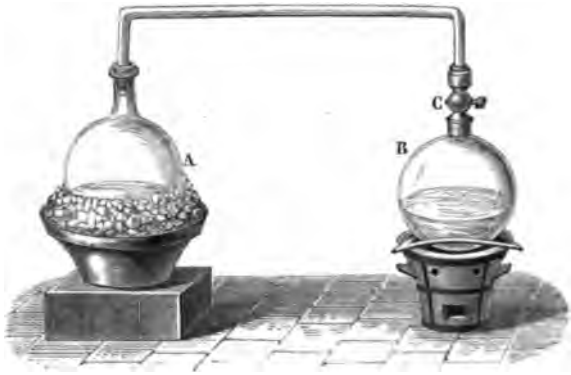


Fig. 182.

à des températures inégales, sont mis en communication, la tension commune de vapeur qui s'établit dans ces deux vases n'est pas, comme on pourrait le croire, la tension moyenne entre celles qui existent déjà dans chacun d'eux. Par exemple, soient deux ballons, l'un A (fig. 182), contenant de l'eau maintenue à zéro dans de la glace fondante; l'autre, B, contenant de l'eau à 100 degrés. Tant que ces deux ballons ne communiquent pas, la tension, dans le premier, est, en millimètres, 4,6, et, dans le second, 760, d'après les tableaux ci-dessus. Mais aussitôt que la communication est établie, en ouvrant le robinet C, la vapeur du ballon B, en vertu de son excès de tension, se précipite dans le ballon A; or, comme elle s'y condense immédiatement, puisque celui-ci est maintenu à zéro, il en résulte que la vapeur ne peut acquérir, dans le ballon B, une tension supérieure à celle du ballon A, c'est-à-dire à celle qui correspond à zéro.

On peut donc poser ce principe général que *lorsque deux vases, contenant le même liquide en excès et à des températures inégales, communiquent entre eux, la tension de la vapeur est la même dans ces deux vases, et égale à la tension qui correspond à la plus basse des deux températures.* On verra bientôt l'application qui a été faite par Watt, de ce principe, au condenseur des machines à vapeur.

288. **Évaporation ; causes qui l'accélèrent.** — On a déjà vu (279) qu'on entend par *évaporation* une production lente de vapeur à la surface d'un liquide. C'est par suite d'une évaporation spontanée que les étoffes mouillées sèchent à l'air, ou qu'un vase ouvert, rempli d'eau, se vide complétement au bout d'un certain temps. C'est à l'évaporation qui se produit à la surface des mers, des lacs, des rivières et du sol, que sont dues les vapeurs qui s'élèvent dans l'atmosphère, s'y condensent en nuages et se résolvent en pluie.

Quatre causes influent sur la rapidité de l'évaporation d'un liquide : 1° la température ; 2° la quantité de vapeur du même liquide r. pandue déjà dans l'atmosphère ambiante; 3° le renouvellement de cette atmosphère ; 4° l'étendue de la surface d'évaporation.

L'accroissement de température accélère l'évaporation par l'excès de force élastique qu'il determine dans les vapeurs.

Pour comprendre l'influence de la seconde cause, remarquons que l'évaporation d'un liquide serait nulle dans un espace saturé de la vapeur du même liquide, et qu'elle atteindrait son maximum dans un air complétement purgé de cette vapeur. Il résulte de là qu'entre ces deux cas extrêmes, la rapidité de l'évaporation varie, selon que l'atmosphère ambiante est déjà plus ou moins chargée des mêmes vapeurs.

Quant au renouvellement de cette atmosphère, son effet s'explique de la même manière ; car si l'air ou le gaz qui enveloppe le liquide n'est pas renouvelé, il est promptement saturé, et toute évaporation cesse.

L'influence de la quatrième cause est évidente.

289. **Ébullition ; ses lois.** — On nomme *ébullition* une production rapide de vapeur, en bulles plus ou moins grosses, dans la masse même d'un liquide.

Lorsqu'on chauffe un liquide, de l'eau, par exemple, par la partie inférieure, les premières bulles qui apparaissent ne sont autre chose que de l'air en dissolution dans l'eau, qui se dégage. Puis, de petites bulles de vapeurs s'élèvent bientôt de tous les points

échauffés des parois; mais, traversant les couches supérieures, dont la température est plus basse, elles s'y condensent avant d'atteindre la surface. C'est la formation et la condensation successives de ces premières bulles de vapeur qui occasionnent le bruissement qui précède ordinairement l'ébullition. Enfin, de grosses bulles s'élèvent et crèvent à la surface, ce qui constitue le phénomène de l'ébullition (fig. 183).

Fig. 183.

Tous les liquides susceptibles d'entrer en ébullition présentent les trois lois suivantes, qui se constatent par l'expérience :

1° *La température d'ébullition augmente avec la pression;*

2° *Pour une pression donnée, l'ébullition ne commence qu'à une température déterminée, qui varie d'un liquide à un autre, mais qui, à pression égale, est toujours la même pour un même liquide;*

3° *Quelle que soit l'intensité de la source de chaleur, à partir du moment où l'ébullition commence, la température reste stationnaire.*

Températures d'ébullition à la pression 0m,76.

Acide sulfureux	— 10°	Essence de térébenthine	150°
Éther chlorhydrique	11	Phosphore	290
Éther sulfurique	37	Acide sulfurique concentré	325
Alcool	79	Mercure (au thermomètre à air).	350
Eau distillée	100	Soufre	440

Plusieurs causes peuvent faire varier la température d'ébullition d'un liquide, savoir : les substances en dissolution, la nature des vases, et la pression. Nous allons successivement faire connaître les effets de ces différentes causes, particulièrement sur l'eau.

290. Influence des substances en dissolution sur la température d'ébullition. — Une substance dissoute dans un liquide, lorsqu'elle n'est point volatile, ou qu'elle l'est moins que le liquide, retarde l'ébullition d'autant plus qu'il y a davantage de la substance en dissolution. L'eau, qui bout à 100 degrés lorsqu'elle est pure, ne bout qu'aux temperatures suivantes lorsqu'elle est saturée de différents sels :

L'eau	saturée	de sel marin bout à.....	109 degrés.
—	—	d'azotate de potasse.....	116
—	—	de carbonate de potasse..	135
—	—	de chlorure de calcium...	179

Les dissolutions acides présentent des résultats analogues ; mais les substances purement en suspension, comme les matières terreuses, la sciure de bois, n'élèvent pas la température d'ébullition.

L'air en dissolution dans l'eau a aussi une influence très-marquée sur la température à laquelle elle entre en ébullition. En effet, Deluc a remarqué, le premier, que de l'eau privée d'air par l'ébullition et renfermée dans un matras à long col, pouvait être portée à 112 degrés sans entrer en ébullition. Le même fait a été constaté par M. Donny et par M. Galy-Casalat. Ce dernier physicien ayant recouvert d'une couche d'huile de l'eau purgée d'air par l'ébullition, l'a portée à 123 degrés sans que le liquide commençât à bouillir ; mais bientôt il se fit une violente explosion de vapeur, laquelle projeta en partie l'eau hors du vase qui la contenait.

Il importe de rappeler ici les expériences de M. Rudberg, déjà citées page 219 ; expériences dans lesquelles ce savant a constaté que lorsque la température de l'ébullition de l'eau est au-dessus de 100 degrés par l'effet des substances qu'elle tient en dissolution, la température de la vapeur qui se dégage est cependant toujours à 100 degrés, comme avec l'eau pure, si la pression est $0^m,76$.

291. Influence de la nature des vases sur la température d'ébullition. — Gay-Lussac a observé que, dans un vase de verre, l'eau bout à une température plus élevée que dans un vase de métal, phénomène qu'il a attribué à l'affinité du verre pour l'eau. En prenant pour 100 degrés la température d'ébullition de l'eau distillée, dans un vase de cuivre et à la pression $0^m,76$, il a trouvé qu'à pression égale, ce liquide, dans un ballon de verre, n'entre en ébullition qu'à 101 degrés ; et quand le vase de verre a été bien nettoyé avec de l'acide sulfurique concentré ou de la potasse, la température de l'eau peut s'élever jusqu'à 105 et même 106 degrés.

Toutefois, un simple fragment de métal, placé au fond du ballon, suffit pour ramener la température de l'ébullition à 100 degrés, et, en même temps, pour faire disparaître les soubresauts violents qui accompagnent l'ébullition des dissolutions salines ou acides dans les vases de verre.

De même que pour les substances en dissolution, la température de la vapeur n'est pas influencée par celle que prend l'eau dans les vases de verre. A la pression $0^m,76$, elle est encore 100 degrés, ainsi que dans les vases de cuivre.

292. **Influence de la pression sur la température d'ébullition.** — D'après les tables des forces élastiques données précédemment (page 265), on reconnaît qu'à 100 degrés, température à laquelle l'eau distillée entre en ébullition, sous la pression $0^m,76$, la vapeur de ce liquide a une tension précisément égale à cette pression. Ce principe est général et peut s'énoncer ainsi : *Tout liquide entre en ébullition au moment où la tension de sa vapeur égale la pression qu'il supporte.* On conçoit dès lors que cette pression augmentant ou diminuant, la tension de la vapeur et, par conséquent, la température nécessaire à l'ébullition, doivent croître ou décroître.

Pour démontrer que la température d'ébullition s'abaisse lorsque la pression est plus faible, on place, sous le récipient de la machine pneumatique, une capsule contenant de l'eau à 30 degrés environ, puis on fait le vide. On voit aussitôt le liquide entrer en ébullition avec une grande rapidité, bien qu'en vase clos; ce qui résulte de ce que la vapeur est aspirée par la machine à mesure qu'elle se produit.

C'est par l'effet de la diminution de la pression atmosphérique que, sur les hautes montagnes, l'eau bout au-dessous de 100 degrés. Sur le mont Blanc, par exemple, ce liquide entre en ébullition à 84 degrés. Cette propriété a été appliquée récemment dans un petit appareil, l'*hysomètre*, qui fait connaître la hauteur d'un lieu d'après la température à laquelle l'eau y entre en ébullition.

Si, au contraire, la pression augmente, l'ébullition est retardée. Elle n'a lieu pour l'eau, par exemple, qu'à 120,6 degrés, quand la pression est de deux atmosphères.

293. **Bouillant de Franklin.** — On démontre encore l'influence de la pression sur la température d'ébullition au moyen du *bouillant de Franklin*. C'est un petit appareil de verre, qui se compose d'une boule *a* et d'un tube *b*, réunis par un tube d'un petit diamètre (fig. 184). Le tube *b* étant effilé à son extrémité supérieure, avant qu'il soit fermé, on y introduit de l'eau; puis, faisant

passer le liquide dans la boule *a*, on le fait bouillir en chauffant celle-ci avec une lampe à alcool. Lorsqu'on juge que les vapeurs dues à l'ébullition ont entraîné, en se dégageant, tout l'air qui était dans l'appareil, on ferme l'extrémité du tube *b* en la fondant à la lampe. Le vide étant alors fait dans l'appareil, ou du moins celui-ci ne contenant plus d'air, l'eau ne supporte d'autre pression que la tension de sa vapeur, tension qui, à la température ordinaire, est très-faible. Il résulte de là que, prenant la boule *a* dans la main, la chaleur seule de celle-ci donne à la vapeur une tension qui refoule l'eau dans le tube *b* et y détermine une forte ébullition.

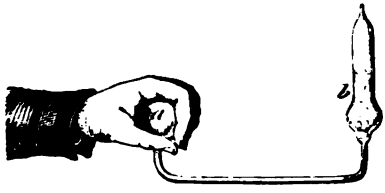


Fig. 184.

294. Production de la vapeur en vase clos. — Jusqu'ici, nous avons supposé que les vapeurs se produisaient dans un espace indéfini où elles pouvaient se répandre librement. Ce n'est qu'à cette condition qu'il peut y avoir ébullition; en vase clos, les vapeurs qui se produisent ne trouvant aucune issue, leur tension et leur densité croissent de plus en plus avec la température, mais le dégagement rapide qui constitue l'ébullition est impossible. Par conséquent, tandis que, dans un vase ouvert, la température d'un liquide ne peut dépasser celle de son ébullition, dans un vase clos, au contraire, elle peut s'élever beaucoup au delà. L'état liquide a néanmoins alors une limite, car, d'après les expériences dues à M. Cagniard-Latour, si l'on introduit de l'eau, de l'alcool ou de l'éther dans de forts tubes de verre, et qu'on les ferme à la lampe après en avoir expulsé l'air par l'ébullition, on observe qu'en soumettant ces tubes à une source de chaleur suffisante, il vient un moment où tout à coup le liquide disparaît en se transformant en vapeurs dont le volume diffère peu de celui du liquide. M. Cagniard-Latour a trouvé ainsi que l'éther sulfurique se réduit totalement en vapeur à 200 degrés, dans un espace moindre que le double de son volume à l'état liquide, et que la tension est alors de 38 atmosphères.

295. Marmite de Papin. — Papin, médecin français, mort en 1710, paraît être le premier physicien qui ait étudié les effets de la production de la vapeur en vase clos. L'appareil qui porte son nom est un vase cylindrique de bronze D (fig. 185), muni d'un

couvercle qui peut se fixer très-solidement au moyen d'une vis de pression B, qui le maintient comprimé contre la marmite, malgré la force élastique de la vapeur qui tend à le soulever. Afin de fermer hermétiquement l'appareil, on a soin. avant de serrer le couvercle, d'interposer des feuilles de plomb entre ses bords et ceux de la marmite. A la base d'une cavité cylindrique qui traverse le cylindre S et la tubulure *o*, le couvercle est percé d'un petit orifice recouvert d'un disque sur lequel s'appuie une tige *n*.

Fig 18 (h = 54).

Cette tige, qui traverse le cylindre et la tubulure, se trouve pressée contre le disque obturateur par un levier A, mobile à son extrémité *a*. Enfin, un poids *p*, qui se déplace le long du levier A*a*, permet d'exercer sur la tige *n* une pression d'autant plus grande que ce poids est plus près de l'extrémité A, d'après une propriété connue des leviers (45). La charge du disque pouvant ainsi varier, on la règle de manière que lorsque la vapeur, dans l'intérieur de la marmite, a atteint une tension déterminée, 6 atmosphères par exemple, le disque soit soulevé, et donne issue à la vapeur. On peut ainsi éviter la rupture de l'appareil; c'est pourquoi le mécanisme que nous venons de décrire est désigné sous le nom de ***soupape de sûreté.***

La marmite de Papin étant remplie d'eau aux deux tiers environ et fermée, on la chauffe sur un fourneau. Le liquide peut ainsi être porté à une température beaucoup au-dessus de 100 degrés, et la tension de la vapeur peut atteindre un grand nombre d'atmosphères, suivant la charge qu'on a donnée à la soupape de sûreté.

Si l'on ouvre alors la soupape, un jet de vapeur s'échappe avec sifflement et s'élève à une grande hauteur. L'eau du vase, qui, jusque-là n'avait pas bouilli, entre actuellement en ébullition, et sa température s'abaisse jusqu'à 100 degrés.

La marmite de Papin peut être utilisée pour augmenter l'action dissolvante des liquides, en donnant les moyens de les porter à une température supérieure à celle de leur point d'ébullition; c'est pourquoi on lui donne aussi le nom de *digesteur*.

296. Calorique latent des vapeurs. — D'après la troisième loi de l'ébullition (289), la température des liquides demeurant stationnaire pendant toute la durée du phénomène, il faut en conclure que dans la vaporisation, ainsi que dans la fusion, il y a absorption d'une quantité de chaleur considérable, dont l'unique effet est de faire passer les corps de l'état liquide à l'état aériforme; car cette quantité de chaleur n'agit pas sur le thermomètre, puisque la vapeur qui se dégage est toujours à la même température que son liquide, ou à une température peu inférieure. Il y a donc là encore *calorique latent*, de même que dans la fusion (271); on le désigne aussi sous le nom de *calorique d'élasticité*, ou *calorique de vaporisation*.

Quelle que soit la température à laquelle une vapeur se produit, il y a toujours absorption de calorique latent. Qu'on verse sur la main un liquide volatil, de l'éther, par exemple, on ressent un froid très-vif qui provient du calorique d'élasticité absorbé par le liquide qui se vaporise. Watt avait posé la loi que pour échauffer à partir de zéro et vaporiser un poids donné d'eau, la quantité totale de chaleur était toujours la même, et Southern, en 1803, avait donné cette autre loi que la chaleur latente de vaporisation est toujours la même, quelle que soit la pression. Mais d'après les nombreux travaux de M. Regnault sur la tension des vapeurs, ces deux lois ne peuvent plus être admises comme exactes.

Le calorique latent absorbé par les vapeurs peut devenir une source de froid très-intense, capable de solidifier le mercure (297) et même les gaz, ainsi qu'il sera démontré par l'expérience en parlant de l'appareil de Thilorier (302).

On verra bientôt (337) comment se détermine la quantité de chaleur latente absorbée par les différents liquides pendant la vaporisation.

297. Froid dû à l'évaporation; congélation du mercure. — On vient de voir que lorsqu'un liquide se vaporise, une quantité considérable de calorique est absorbée, à l'état latent, par la vapeur qui se dégage (296). Il résulte de là que si un liquide qui s'évapore ne reçoit pas une quantité de chaleur équivalente à celle qui est absorbée par la vapeur, sa température s'abaisse, et le refroidissement est d'autant plus grand que l'évaporation est plus rapide.

Leslie est parvenu à congeler l'eau par le seul effet d'une vaporisation rapide. Pour cela, on place, sous le récipient de la machine pneumatique, un vase de verre contenant de l'acide sulfurique concentré, et, au-dessus, une petite capsule métallique A (fig. 186), contenant quelques grammes d'eau. En faisant le vide, l'eau entre en ébullition (292), et les vapeurs étant absorbées par l'acide sulfurique à mesure qu'elles se dégagent, il se produit une vaporisation rapide qui amène bientôt la congélation de l'eau qui est dans la capsule.

Si l'on opère avec des liquides plus volatils que l'eau, particulièrement avec l'acide sulfureux, qui bout à — 10 degrés, on produit un froid assez intense pour congeler le mercure. On fait cette expérience en enveloppant de coton une boule de verre pleine de mercure; puis, après l'avoir arrosée d'acide sulfureux, on la place sous la cloche de la machine pneumatique, et on fait le vide; bientôt le mercure est solidifié.

Fig. 186.

Thilorier, en dirigeant un jet d'acide carbonique liquide sur le réservoir d'un thermomètre à alcool, a vu celui-ci descendre jusqu'à 100 degrés au-dessous de zéro, sans que l'alcool se congelât; mais on a déjà vu (273) qu'avec un mélange de protoxyde d'azote liquéfié, d'acide carbonique solide et d'éther, M. Despretz est parvenu à produire un froid assez intense pour amener l'alcool à l'état sirupeux épais.

Le froid produit par l'évaporation est utilisé dans les pays chauds pour rafraîchir l'eau au moyen d'*alcarazas*. On nomme ainsi des vases de terre assez poreux pour que l'eau filtre lentement à travers et vienne s'évaporer à la surface, surtout si on les place dans un courant d'air.

LIQUÉFACTION DES VAPEURS ET DES GAZ.

298. Liquéfaction des vapeurs. — La *liquéfaction* ou *condensation* des vapeurs est leur passage de l'état aériforme à l'état liquide. Trois causes peuvent opérer la condensation : le refroidissement, la compression et l'affinité chimique. Les deux premières causes

exigent que les vapeurs soient à l'état de saturation (282); mais la dernière produit la liquéfaction des vapeurs même les plus raréfiées. C'est ainsi qu'un grand nombre de sels absorbent, en la condensant, la vapeur d'eau de l'atmosphère en quelque faible proportion qu'elle s'y trouve.

Au moment de la condensation des vapeurs, leur calorique latent redevient libre, c'est-à-dire sensible au thermomètre. On le constate en faisant arriver un courant de vapeur à 100 degrés dans un vase d'eau à la température ordinaire. Le liquide s'échauffe rapidement et arrive bientôt à 100 degrés. On admet que la quantité de chaleur ainsi restituée par les vapeurs qui se condensent, est précisément égale à celle qu'elles ont absorbée en se formant, ce qui paraît évident.

299. **Distillation, alambics.** — La *distillation* est une opération qui a pour objet de séparer un liquide volatil des substances fixes qu'il tient en dissolution, ou bien deux liquides inégalement volatils. Cette opération est fondée sur la transformation des liquides en vapeurs par l'action du calorique, et sur la condensation des vapeurs par le refroidissement.

Les appareils employés pour la distillation se nomment *alambics*. Leur forme peut varier de plusieurs manières, mais ils se composent toujours de trois pièces principales : 1° la *cucurbite* B (fig. 187), vase de cuivre rouge étamé, qui contient le liquide à distiller, et dont la partie inférieure est maçonnée dans un fourneau; 2° le *chapiteau* A, qui se pose sur la cucurbite et donne issue à la vapeur par un col latéral R; 3° le *serpentin* C, consistant en un long tuyau d'étain ou de cuivre, enroulé en hélice, et placé dans une cuve remplie d'eau froide; l'objet du serpentin est de condenser la vapeur en la refroidissant.

Cela posé, s'agit-il de distiller, par exemple, de l'eau de puits ou de rivière, pour la débarrasser des sels qu'elle tient en dissolution, et qui sont surtout du sulfate de chaux, du carbonate de chaux et des chlorures; on en remplit la cucurbite aux deux tiers environ, et on chauffe; l'eau entre en ébullition, et les vapeurs qui se dégagent vont se condenser dans le serpentin, d'où l'eau provenant de la condensation se rend ensuite dans le récipient D.

Les vapeur qui se condensent échauffant rapidement l'eau de la cuve (296), il importe de renouveler cette eau constamment, sinon la condensation n'aurait plus lieu. A cet effet, un tube *n*, alimenté d'une manière continue par un courant d'eau froide, conduit celle-ci à la partie inférieure de la cuve, tandis que l'eau chaude, qui est

moins dense, se porte toujours à la partie supérieure, et se déverse par un tube *m* placé au haut de la cuve.

La distillation ne doit pas être poussée trop loin, dans la crainte que l'eau renfermant des matières organiques, celles-ci ne soient décomposées sur les parois chaudes de la cucurbite et ne donnent naissance à des produits volatils.

L'eau distillée est parfaitement limpide et ne laisse aucun résidu après son évaporation ; mais elle renferme toujours un peu d'acide carbonique, car ce gaz, existant dans toutes les eaux naturelles, ne

Fig. 187 (h = 1m,45).

s'en sépare qu'incomplétement par la distillation. On peut éviter la présence de ce gaz en mettant dans la cucurbite une certaine quantité de chaux qui se combine avec lui et le retient.

C'est par la distillation, à l'aide d'alambics analogues à celui décrit ci-dessus, qu'on extrait des vins l'alcool qu'ils contiennent.

300. **Absorption, tubes de sûreté.** — On nomme *absorption*, en chimie, un accident qui se produit dans les appareils qui servent à la préparation des gaz, et qui consiste, lorsque ceux-ci sont recueillis sur l'eau ou sur le mercure, en ce que ces liquides pénètrent dans les appareils et font manquer l'opération.

Cet accident a toujours pour cause l'excès de la pression atmosphérique sur la tension du gaz contenu dans l'appareil. Soit, en effet, un gaz, de l'acide sulfureux, par exemple, se dégageant d'un matras *m* (fig. 188), et se rendant dans une éprouvette A

remplie d'eau. Tant que le gaz se dégage activement, sa tension l'emporte sur la pression atmosphérique et sur le poids de la colonne d'eau *on*; l'eau de l'éprouvette ne peut donc s'élever dans le tube, et l'absorption est impossible; mais si la tension du gaz décroît, soit parce que le dégagement se ralentit, soit parce que le matras s'est refroidi, la pression extérieure l'emporte, et lorsque l'excès de cette pression sur la pression intérieure surpasse le poids de la colonne d'eau *oo*, l'eau pénètre dans le matras, et l'opération est manquée. On prévient cet accident au moyen des *tubes de sûreté*.

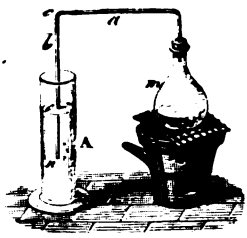


Fig. 188.

On nomme ainsi des tubes destinés à prévenir l'absorption, en laissant rentrer l'air dans les appareils, à mesure que la tension intérieure décroît. Le tube de sûreté le plus simple consiste en un tube droit C*o* (fig. 189), traversant le bouchon qui ferme le matras M, dans lequel le gaz se produit, et plongeant de quelques centimètres dans le liquide contenu dans ce matras. Quand la tension du gaz diminue dans le vase M, la pression atmosphérique, qui s'exerce sur l'eau de la cuve E, la fait monter à une certaine hauteur dans le tube DA; mais cette pression, s'exerçant aussi dans le tube C*o*, tend à déprimer d'autant le liquide qui est dans ce tube, en admettant que ce liquide a sensiblement la même densité que l'eau de la cuve E. Mais, comme la distance *or* est moindre que la hauteur DH, l'air rentre par l'orifice *o*, avant que l'eau de la cuve s'élève jusqu'en A, et il n'y a pas d'absorption.

Fig. 189.

Le tube C*o* sert aussi à prévenir les explosions. Lorsque la production du gaz est trop rapide, et que le tube AD ne peut suffire au dégagement, le liquide contenu dans le matras M est refoulé à l'extérieur et s'échappe par le tube C, qui devient lui-même une

issue pour le gaz aussitôt que le niveau s'est abaissé au-dessous de l'orifice *o*.

La figure 190 représente une autre espèce de tube de sûreté, connu sous le nom de *tube en* S. Ce tube possède une boule *a*, contenant une certaine quantité de liquide, ainsi que la branche *id*. Lorsque la tension du gaz, dans la cornue M, surpasse la pression atmosphérique, le niveau dans la branche *id* s'élève plus haut que dans la boule *a*; si le gaz a une tension d'une atmosphère, le niveau est le même dans le tube et dans la boule; enfin, si la tension du gaz est moindre que la pression atmosphérique, le niveau baisse dans la branche *di*, et comme on a soin que la hauteur *ia* soit moindre que *bh*, aussitôt que l'air entré par la boule *c* est arrivé dans la partie courbe *i*, il soulève la colonne *ia* et pénètre dans la cornue avant que l'eau de l'éprouvette se soit élevée jusqu'en *b*; dès lors la tension intérieure égale la pression extérieure, et l'absorption ne peut avoir lieu.

Fig. 190.

301. **Liquéfaction des gaz.** — Les gaz n'étant autre chose que des vapeurs très-dilatées, sont, comme elles, susceptibles d'être liquéfiés. Mais étant très-loin de leur point de liquéfaction, on ne peut les y ramener que par une pression ou un refroidissement plus ou moins considérable. Pour quelques-uns, la compression seule ou le refroidissement suffit; pour la plupart, ces deux procédés de liquéfaction doivent être employés simultanément. Peu de gaz ont résisté à ces deux actions combinées, et on doit admettre que ceux qui, comme l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, le bioxyde d'azote et l'oxyde de carbone, n'ont pu être liquéfiés, le seraient si on pouvait les soumettre à une pression et à un refroidissement suffisants.

Nous avons déjà dit (126) que M. Faraday a liquéfié un grand nombre de gaz regardés jusqu'alors comme permanents. Son procédé consiste à renfermer dans un tube de verre recourbé en siphon des substances qui, par leur réaction chimique, donnent naissance au gaz qu'il s'agit de comprimer; de sorte que ces substances étant

contenues dans l'une des branches du siphon, le gaz, à mesure qu'il se dégage, vient se comprimer lui-même dans l'autre branche et s'y liquéfier. Le gaz peut ainsi être soumis à des pressions de 40 à 50 atmosphères. Le tube est en outre refroidi à l'aide de mélanges réfrigérants. Un petit manomètre à air comprimé, renfermé dans l'appareil, indique la pression.

C'est par ce procédé que M. Faraday, le premier, a liquéfié l'acide carbonique, à zéro et sous une pression de 35 atmosphères.

302. **Appareil à liquéfier et à solidifier l'acide carbonique.** —

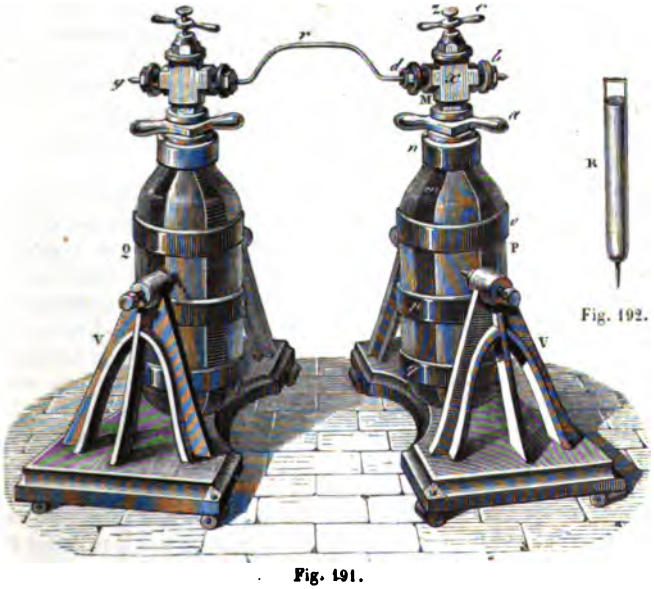


Fig. 192.

Fig. 191.

L'acide carbonique ne pouvant être amené à l'état liquide que par une pression considérable, sa liquéfaction ne doit s'opérer que dans des appareils spéciaux, présentant la plus grande solidité. Le premier appareil de ce genre a été construit par Thilorier. La figure 191 représente une appareil à liquéfier l'acide carbonique, construit récemment par MM. Deleuil; il est une modification de celui de Thilorier, mais une modification importante pour la solidité.

Ce nouvel appareil se compose de deux cylindres P et Q entière-

ment semblables, mobiles l'un et l'autre, dans un plan vertical, autour de deux pivots sontenus par de forts châssis de fonte VV. Ces cylindres, qui sont en fonte et d'une capacité de six litres environ, ont une épaisseur de 3 centimètres; mais, dans le sens de leur longueur, ils portent quatre nervures ayant un centimètre de saillie sur le reste de la paroi et une largeur de 8 centimètres. Pour donner à l'appareil toute la résistance nécessaire, des bandes de fer doux *m*, partant du haut des cylindres, s'emboîtent dans le creux formé par deux nervures consécutives, s'enroulent au bas des cylindres, dont le fond inférieur est hémisphérique, puis reviennent sur l'autre face des cylindres se terminer à l'extrémité d'où elles sont parties. Enfin, ces bandes sont fortement maintenues par quatre cercles *n*, *o*, *p*, *q*, aussi en fer doux. Avant de mettre ces cercles en place, on les porte à la température rouge, de manière qu'en se refroidissant ils exercent, par leur contraction, une pression considérable sur les bandes longitudinales et sur les cylindres.

Sur la tête de chaque cylindre est un robinet M formé de plusieurs pièces. Une clef *a* sert à le serrer fortement dans un écrou taraudé dans la masse de fonte. Dans le robinet est un conduit vertical qui se bifurque en *x* vers *b* et vers *d*, et met ainsi l'intérieur du cylindre en communication avec deux orifices pratiqués en *b* et en *d*, dont on n'ouvre jamais qu'un seul à la fois. Une vis *z*, qui se serre à l'aide d'une clef *c*, est destinée à fermer le conduit intérieur avant sa bifurcation en *x*. Pour cela, elle comprime une boule de plomb qui ferme hermétiquement l'orifice du conduit. C'est de la même manière que sont fermés les orifices *d* et *b* à l'aide d'écrous de pression.

Cela posé, les deux cylindres étant identiques, on prend pour générateur de l'acide carbonique celui qu'on veut, l'autre sert de récipient pour sa liquéfaction. Supposons que ce soit le cylindre P qu'on ait choisi pour générateur, le robinet M étant enlevé, on introduit dans le cylindre 1800 grammes de bicarbonate de soude, trois litres d'eau chauffée à 39°, et un kilogramme d'acide sulfurique. Afin que ce dernier ne décompose pas de suite le bicarbonate de soude, on le verse dans un long tube R (fig. 192), en cuivre rouge, et on place ce tube, qui reste ouvert à l'extrémité supérieure, dans le cylindre P.

Cela fait, on remet le robinet M, qu'on serre fortement; puis la vis *z* fermant le robinet, on incline doucement le cylindre, en le faisant osciller sur ses deux pivots, de manière qu'une petite quan-

tité d'acide sulfurique se déverse du vase R et tombe sur le bicarbonate. On incline ainsi successivement le cylindre, mais à plusieurs fois, jusqu'à ce que tout l'acide soit déversé.

On estime à 7 minutes le temps nécessaire pour que la réaction chimique soit terminée. L'acide carbonique qui s'est produit dans le générateur est alors en partie liquéfié et mélangé à l'eau qui a servi à sa préparation. Mais si l'on fait communiquer le récipient Q au générateur par un tube de cuivre *r*, à petit diamètre, et si l'on desserre la vis *z*, l'acide carbonique distille dans le récipient, où il se liquéfie de nouveau par sa propre pression. Thilorier a estimé que la pression qui a lieu alors dans le récipient est de 50 atmosphères, la température étant de 15 degrés.

En recommençant cinq ou six fois la même opération, on condense dans le récipient jusqu'à deux litres d'acide carbonique liquide.

Pour obtenir le même acide à l'état solide, le robinet du récipient porte, à sa partie inférieure, une tubulure qui plonge dans l'acide liquide. Par suite, lorsqu'on ouvre un orifice *g* placé sur le côté du robinet, par l'effet de la pression qu'il supporte, l'acide carbonique liquide jaillit avec force, en repassant à l'état aériforme. Mais une partie du liquide seulement se gazéifie, car le calorique latent absorbé pendant ce changement d'état est si considérable (296) que l'autre partie du liquide, cédant son calorique de liquéfaction, se solidifie en flocons blancs, cristallisés sous une forme filamenteuse.

L'acide carbonique solide ne se vaporise que très-lentement. On peut constater alors, au moyen d'un thermomètre à alcool, que sa température est d'environ — 90 degrés. Cependant, placé sur la main, il n'y produit pas une sensation de froid aussi vive qu'on pourrait le penser, ce qui provient de ce qu'il n'y a pas contact parfait; mais si on le mélange avec de l'éther, le froid est tellement intense, qu'un flocon d'acide carbonique solide posé sur les chairs, désorganise les tissus, comme le ferait une vive brûlure. Un pareil mélange solidifie, en quelques secondes, quatre fois son poids de mercure. En y plongeant un tube plein d'acide carbonique liquide, M. Faraday a pu solidifier ce dernier en une masse compacte présentant l'apparence d'un morceau de glace bien transparente.

303. **Appareil à liquéfier le protoxyde d'azote.** — Dans l'appareil qui vient d'être décrit, c'est le gaz acide carbonique qui se comprime lui-même en se produisant en quantité suffisamment abondante. Or, tous les gaz ne s'obtiennent pas dans des condi-

tions convenables pour pouvoir ainsi se liquéfier par leur propre pression. Il faut alors avoir recours à une pression artificielle; c'est de la sorte que M. Natterer a liquéfié plusieurs gaz en les

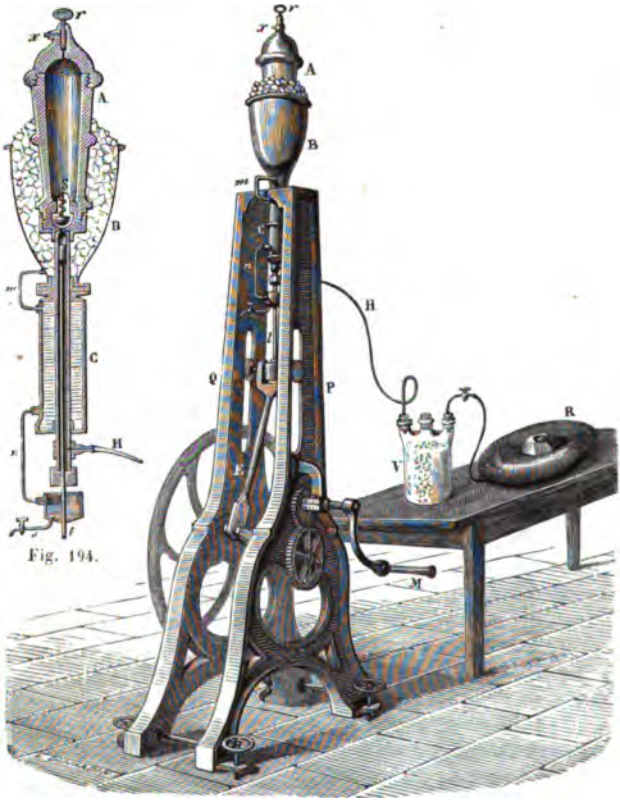


Fig. 193.

comprimant dans un canon de fusil à l'aide d'une pompe foulante.

M. Bianchi a modifié l'appareil de M. Natterer et lui a donné la forme représentée en perspective dans la figure 193, et en coupe, sur une plus grande échelle, dans la figure 194. Cet appareil se compose d'un réservoir A, en fer forgé, d'une capacité de 7 à 8 dé-

cilitres, et pouvant résister à des pressions de plus de 600 atmosphères. A la partie inférieure de ce réservoir est vissée une petite pompe foulante. La tige *t* de son piston reçoit son mouvement de va-et-vient d'une bielle E, mise en mouvement au moyen d'une manivelle M. Comme la compression du gaz et le frottement du piston donnent lieu à un grand dégagement de chaleur, on entoure le réservoir A d'une cuvette B, dans laquelle est de la glace; de plus, l'eau provenant de la fusion de la glace se rend par une tubulure *m* dans un manchon de cuivre C, qui enveloppe la pompe foulante, et de là se dégage par une seconde tubulure *n* et un robinet *o*. Enfin, tout le système est monté sur un châssis de fonte PQ.

Cela posé, le gaz qu'on veut liquéfier est recueilli d'avance dans des poches imperméables R, d'où il se rend dans un vase V plein de chlorure de calcium, ou de toute autre matière desséchante; puis, de là, à la pompe foulante, par un tube de caoutchouc H. Lorsqu'on a fait marcher l'appareil un certain temps, on dévisse le réservoir de dessus la pompe, et cela sans que le gaz liquéfié puisse s'échapper, le réservoir A se trouvant hermétiquement fermé, à sa partie inférieure, par une soupape S (fig. 194). Pour recueillir ensuite le liquide contenu dans le réservoir, on retourne celui-ci et on desserre un bouchon à vis *r*, qui donne issue au liquide par une petite tubulure *x*.

La liquéfaction la plus remarquable obtenue à l'aide de cet appareil est celle du protoxyde d'azote. Une fois liquéfié, ce gaz, quoique en vase ouvert, ne se vaporise que lentement et se maintient à une température fixe de 88 degrés au-dessous de zéro. Le mercure qu'on y projette en petite quantité se congèle aussitôt. Il en est de même de l'eau, mais il faut la verser goutte à goutte, sinon le calorique latent de ce liquide étant beaucoup plus grand que celui du mercure (326), la chaleur cédée par l'eau, au moment de sa congélation, peut être assez considérable pour faire détoner le protoxyde d'azote.

Le protoxyde d'azote étant facilement décomposé par la chaleur, a, comme on sait en chimie, la propriété d'entretenir la combustion presque aussi vivement que l'oxygène. Or, il conserve encore cette propriété à l'état liquide, malgré sa basse température. En effet, si l'on y projette un petit morceau de charbon incandescent, celui-ci brûle aussitôt avec un vif éclat.

MÉLANGE DES GAZ ET DES VAPEURS.

304. **Lois des mélanges des gaz et des vapeurs.** — Tout mélange d'un gaz et d'une vapeur présente les deux lois suivantes :

1° *La tension et, par suite, la quantité de la vapeur qui sature un espace donné, sont les mêmes, à température égale, quand cet espace contient un gaz, que lorsqu'il est vide.*

2° *La force élastique du mélange égale la somme des forces élastiques du gaz et de la vapeur mélangés, le gaz étant rapporté à son volume primitif.*

Fig. 195 (h = 1m,18).

Ces lois, connues sous le nom de *lois de Dalton*, qui le premier les a fait connaître, se démontrent au moyen d'un appareil très-simple dû à Gay-Lussac et représenté dans la figure 195. Il se compose d'un tube de verre A mastiqué, par ses extrémités, à deux robinets de fer *b* et *d*. Le robinet inférieur est muni d'une tubulure qui met en communication le tube A avec un second tube B d'un plus petit diamètre. Une échelle placée entre ces deux tubes est destinée à mesurer la hauteur des colonnes de mercure contenues dans chacun.

Cela posé, le tube A étant rempli de mercure, et les robinets *b* et *d* étant fermés, on visse d'abord sur le robinet *b*, à la place de l'entonnoir C, un ballon de verre M fermé lui-même par un robinet, et rempli d'air desséché, ou de tout autre gaz. Puis, ouvrant les trois robinets, on laisse écouler du tube A une partie du mercure, qui est remplacée par l'air sec du ballon. On ferme alors les robinets, et comme l'air qui est dans l'espace A s'est dilaté en sortant

du ballon, il est à une pression moindre que la pression atmosphérique; on l'y ramène en versant du mercure dans le tube B, jusqu'à ce que le niveau soit le même dans les deux tubes. Enfin, on enlève le ballon et son robinet, et on met à la place un entonnoir C muni lui-même d'un robinet *a*, qui diffère des robinets ordinaires. En effet, il n'est pas percé de part en part, mais porte seulement une petite cavité, ainsi qu'on le voit en *n* sur la gauche de la figure. Ayant versé dans l'entonnoir C le liquide qu'on veut faire vaporiser, ayant noté le niveau *k* du mercure et ouvert le robinet *b*, on tourne le robinet *a* de manière que sa cavité se remplisse de liquide; puis on le retourne afin que le liquide pénètre dans l'espace A et s'y vaporise. On continue à faire tomber ainsi le liquide goutte à goutte, jusqu'à ce que l'air qui est dans le tube soit saturé de vapeur, ce qu'on reconnaît quand le niveau *k* du mercure cesse de s'abaisser (282).

Comme la tension de la vapeur qui s'est produite dans l'espace A s'est ajoutée à celle de l'air qui y était déjà, le volume du gaz s'est augmenté, mais on le ramène facilement au volume primitif en versant de nouveau du mercure dans le tube B. Lorsque le mercure est ainsi remonté dans le gros tube, au niveau *k* qu'il avait d'abord, on observe dans les tubes B et A une différence de niveau B*o* qui représente évidemment la tension de la vapeur qui s'est produite, car l'air ayant repris son premier volume, sa tension n'a pas changé. Or, si l'on fait passer dans le vide d'un tube barométrique quelques gouttes du même liquide introduit dans l'espace A, on observe une dépression précisément égale à B*o*, ce qui démontre bien qu'à température égale la tension d'une vapeur à l'état de saturation est la même dans les gaz que dans le vide : d'où l'on conclut qu'à température égale la quantité de vapeur est aussi la même.

Quant à la seconde loi, elle se trouve démontrée par l'expérience ci-dessus, puisque, lorsque le mercure a repris son niveau *k*, le mélange supporte la pression atmosphérique qui s'exerce au sommet du tube B, plus le poids de la colonne de mercure B*o*. Or, ces deux pressions représentent précisément, l'une la tension de l'air sec, et l'autre la tension de la vapeur. Du reste, la seconde loi peut être regardée comme une conséquence de la première.

L'appareil que nous venons de décrire ne permet d'expérimenter qu'à la température ordinaire; mais M. Regnault, au moyen d'un appareil qui peut être porté à différentes températures, a comparé successivement, dans l'air et dans le vide, les tensions de vapeur d'eau, d'éther, de sulfure de carbone et de benzine; et il a con-

stamment observé que la tension dans l'air est plus faible que dans le vide. Toutefois, les différences sont tellement petites qu'elles n'infirment pas la loi de Dalton et de Gay-Lussac ; aussi M. Regnault pense-t-il qu'on doit continuer à admettre cette loi comme rigoureuse théoriquement, attribuant les petites différences qu'il a constatées à l'affinité hygroscopique des parois des tubes.

305. **Problèmes sur les mélanges des gaz et des vapeurs.** — I. — Étant donné un volume d'air sec V, à la pression H, on demande quel sera son volume V′ quand il sera saturé, la température et la pression restant les mêmes.

Si l'on représente par F la force élastique de la vapeur qui sature l'air, celui-ci, dans le mélange, est seulement soumis à la pression H — F (304, 2°). Or, d'après la loi de Mariotte, les volumes V et V′ étant en raison inverse des pressions qu'ils supportent, on a

$$\frac{V'}{V} = \frac{H}{H - F}, \text{ d'où } V' = \frac{VH}{H - F}.$$

II. — Étant donné un volume d'air saturé V, à la pression H et à la température t, quel sera son volume V′, aussi saturé, à la pression H′ et à la température t' ?

Si l'on représente par f la tension maximum de la vapeur à t degrés, et par f' aussi sa tension maximum à t' degrés, l'air seul, dans chacun des mélanges V et V′, sera soumis respectivement aux pressions $H - f$ et $H' - f'$. En supposant d'abord la température constante, on aura donc, d'après la loi de Mariotte,

$$\frac{V'}{V} = \frac{H - f}{H' - f'}.$$

Pour tenir compte du changement de température, il faut observer que les volumes V′ et V étant l'un à la température t', l'autre à la température t, ils sont entre eux dans le rapport de $1 + \alpha t'$ à $1 + \alpha t$, α étant le coefficient de dilatation de l'air : donc la formule cherchée est enfin

$$\frac{V'}{V} = \frac{H - f}{H' - f'} \cdot \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}.$$

III. — On demande le poids P d'un volume d'air V, saturé de vapeur d'eau, à la température t et à la pression H.

Le poids d'un litre d'air sec, à zéro et à la pression 0,76, étant 1gr,3, son poids, toujours à zéro, mais à la pression H, est $1^{gr},3 \cdot \frac{H}{0,76}$, puisque le poids d'un gaz est directement proportionnel à la pression ; et enfin, à t degrés, ce poids devient

$$1^{gr},3 \cdot \frac{H}{0,76} \cdot \frac{1}{1 + \alpha t} \text{ (264, prob. 6).}$$

Donc le volume d'air sec V pèse, à t degrés et à la pression H,

$$1^{gr},3 \cdot V \cdot \frac{H}{0,76} \cdot \frac{1}{1 + \alpha t} \cdot [1]$$

or, une fois que l'air est saturé, si l'on représente par F la force élastique maximum de la vapeur, il arrive qu'une portion de cet air, dont le poids serait

$$1^{gr},3 \cdot V \cdot \frac{F}{0,76} \cdot \frac{1}{1 + \alpha t} \text{ [2].}$$

est remplacée par de la vapeur d'eau dont la densité est 0,6235, c'est-à-dire très-approximativement les $\frac{5}{8}$ de celle de l'air, dans les mêmes circonstances de pression et de température; par suite, le poids de cette vapeur est seulement les $\frac{5}{8}$ du poids de l'air qu'elle déplace, c'est-à-dire $1^{gr},3 \,.\, V \,.\, \frac{F}{0,76} \,.\, \frac{1}{1+\alpha t} \,.\, \frac{5}{8}$ [3].

Donc, enfin, le poids cherché est représenté par la formule [1] diminuée de la formule [2] et augmentée de la formule [3], ce qui donne

$$P = 1^{gr},3 \,.\, V \,.\, \frac{H - F + \frac{5}{8} F}{0,76} \,.\, \frac{1}{1+\alpha t} = 1^{gr},3 \,.\, V \,.\, \frac{H - \frac{3}{8} F}{0,76} \,.\, \frac{1}{1+\alpha t}$$

* ÉTAT SPHÉROIDAL.

306. **Expériences de M. Boutigny.** — Les liquides versés sur des surfaces métalliques incandescentes présentent des phénomènes remarquables, observés pour la première fois par Leidenfrost, il y a près d'un siècle, et étudiés ensuite par quelques physiciens; mais c'est particulièrement M. Boutigny qui depuis quelques années a fait connaître les expériences curieuses dont nous allons exposer les principales.

Ayant chauffé jusqu'au rouge une capsule d'argent ou de platine, à parois épaisses, si l'on y verse quelques grammes d'eau au moyen d'une pipette, on remarque que le liquide ne s'étale pas dans la capsule et ne la mouille pas, comme il le fait à la température ordinaire, mais qu'il prend la forme d'un globe aplati, ce que M. Boutigny exprime en disant que le liquide passe à l'*état sphéroïdal*. A cet état, l'eau est animée d'un mouvement giratoire rapide sur le fond de la capsule, et non-seulement elle n'entre pas en ébullition, mais elle se vaporise 50 fois plus lentement que s'il y avait ébullition. Enfin, si la capsule se refroidit, il vient un moment où elle n'est plus assez chaude pour maintenir l'eau à l'état sphéroïdal. Ses parois sont alors mouillées par le liquide, et une ébullition violente se manifeste tout à coup.

Tous les liquides peuvent prendre l'état sphéroïdal, et la température nécessaire pour que le phénomène se produise est d'autant plus élevée que le point d'ébullition du liquide l'est lui-même davantage. Pour l'eau, la capsule doit être chauffée au moins à 200 degrés; pour l'alcool, à 134.

M. Boutigny a observé que la température des liquides, à l'état sphéroïdal, est constamment inférieure à celle de leur ébullition. L'eau, par exemple, reste à 95°,5; l'alcool, à 75°,5; l'éther, à 34 degrés; l'acide sulfureux, à — 10°,5. Mais la température de la vapeur qui se dégage est égale à celle de la capsule, d'où l'on doit conclure que cette vapeur ne se produit pas dans la masse du liquide.

Cette propriété des liquides, à l'état sphéroïdal, de se maintenir à une température inférieure à celle de leur point d'ébullition, a conduit M. Boutigny à une expérience remarquable, celle de la congélation de l'eau dans une capsule incandescente. Ce physicien chauffe au rouge blanc une capsule de platine, et y verse quelques grammes d'acide sulfureux anhydre. Ce liquide, qui ne bout qu'à — 10 degrés, se comporte dans la capsule comme on l'a vu ci-dessus, c'est-à-dire que sa température s'abaisse au-dessous de — 10 degrés. Si alors on ajoute à l'acide sulfureux une petite quantité d'eau, celle-ci, refroidie par l'acide, se congèle instantanément, et la capsule étant encore rouge, on en retire, non sans étonnement, un morceau de glace.

A l'état sphéroïdal il n'y a point contact entre le liquide et le corps chaud. M. Boutigny s'en est assuré en faisant rougir une plaque d'argent disposée bien horizontalement et en versant dessus un gramme d'eau colorée en noir. Ce liquide passe à l'état sphéroïdal; or, si l'on place alors la flamme d'une bougie à une certaine distance sur le prolongement de la plaque, on distingue nettement et d'une manière continue cette flamme entre le sphéroïde d'eau et la plaque. On conclut de là que le liquide se maintient à une petite distance de celle-ci, ou qu'il fait des vibrations assez rapides pour que l'œil ne puisse les distinguer.

Pour expliquer les phénomènes que présentent les liquides à l'état sphéroïdal, on admet que le globule liquide est soutenu à distance du vase par la tension de la vapeur qui se produit à sa surface, en sorte que le liquide n'étant pas chauffé par contact, mais seulement par rayonnement, ne se vaporise que lentement; surtout si l'on observe que l'eau étant diathermane pour les rayons émis par une source intense (360), la plus grande partie du calorique rayonnant la traverse sans l'échauffer. M. Boutigny pense que la cause qui empêche le liquide de mouiller le métal est une force répulsive qui se produit entre le corps chaud et le liquide, répulsion qui serait d'autant plus intense que la température est plus élevée. Cette hypothèse s'accorde avec l'expérience suivante de M. Perkins, en Angleterre. Un robinet ayant été posé sur un générateur de vapeur, au-dessous du niveau de l'eau, le liquide ne s'écoulait pas par le robinet lorsque les parois du générateur étaient portées à une très-haute température, quoique la pression intérieure fût considérable; mais, à une température moins élevée, le liquide jaillissait avec force.

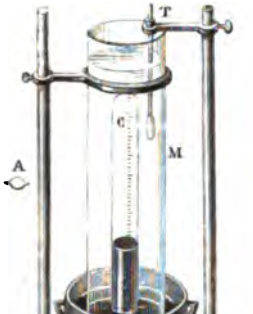


Fig. 196 (h = 51).

* DENSITÉ DES VAPEURS.

307. Méthode de Gay-Lussac. — On nomme *densité d'une vapeur* le rapport entre le poids d'un certain volume de cette vapeur et celui d'un même volume d'air, à température et à tension égales.

Deux méthodes ont été suivies pour déterminer la densité des vapeurs : la première, due à Gay-Lussac, est applicable aux liquides qui entrent en ébullition au-dessous de 100 degrés ou peu au-dessus; la seconde, due à M. Dumas, permet d'opérer à des températures qui peuvent aller jusqu'à 360 degrés environ.

La figure 196 représente l'appareil de Gay-Lussac. Il se compose d'une marmite de fonte remplie de mercure dans lequel plonge un manchon de verre M. Celui-ci est plein d'eau ou d'huile, dont la température est indiquée par un thermomètre T. Dans l'intérieur du manchon est une cloche graduée C, qui est d'abord remplie de mercure.

Pour expérimenter avec cet appareil, on introduit le liquide à vaporiser dans une petite ampoule de verre comme celle qui est représentée en A, à gauche de la figure; fermant ensuite cette ampoule à la lampe, on la pèse, et en retranchant du poids obtenu celui de l'ampoule quand elle était vide, on a le poids du liquide introduit. On fait alors

passer l'ampoule dans la cloche C, et on chauffe graduellement jusqu'à ce que l'eau du manchon atteigne une température supérieure de quelques degrés à celle à laquelle le liquide de l'ampoule entre en ébullition. Celle-ci éclate par la dilatation du liquide qu'elle contient, et, en se vaporisant, ce liquide déprime le mercure qui est dans la cloche, comme on le voit dans la figure. Il importe que l'ampoule soit assez petite pour que tout le liquide qu'on y a introduit soit réduit en vapeur. C'est ce qui a lieu lorsque, le bain ayant atteint la température d'ébullition du liquide de l'ampoule, le niveau du mercure est cependant un peu plus haut à l'intérieur de la cloche qu'à l'extérieur. Cela montre, en effet, qu'il ne reste pas de liquide non vaporisé, car alors le niveau intérieur serait sensiblement le même qu'à l'extérieur (284). On est donc certain que le poids du liquide qui était dans l'ampoule représente exactement le poids de la vapeur qui s'est formée dans la cloche C. Quant au volume de cette vapeur, il est connu au moyen de l'échelle graduée qui est sur la cloche. Sa température est donnée par le thermomètre T, et la pression égale la hauteur du baromètre, moins celle du mercure qui reste dans la cloche. Il n'y a plus qu'à calculer le poids d'un volume d'air qui serait égal à celui de la vapeur et dans les mêmes conditions de température et de pression; puis enfin à diviser le poids de la vapeur par celui de l'air : le quotient est la densité ou le poids spécifique cherché.

Voici, du reste, la marche à suivre pour faire ces calculs. Représentons par p le poids de la vapeur en grammes, par v son volume en litres, par t sa température, par H la hauteur du baromètre, et par h la hauteur du mercure dans la cloche, d'où il résulte que la pression de la vapeur est $H - h$.

Il s'agit d'obtenir le poids p' d'un volume d'air v à la température t et sous la pression $H - h$. Or, à zéro et sous la pression $0^m,76$, un litre d'air pesant $1^{gr},3$, le poids du volume v, à la même pression et à zéro, est $1^{gr},3 \times v$. Pour calculer le poids du même volume d'air à t degrés, soit α le coefficient de dilatation de l'air, le volume sera augmenté de zéro à t degrés, dans le rapport de 1 à $1 + \alpha t$; au contraire, le poids, à volume égal, décroît dans le rapport de $1 + \alpha t$ à 1. Donc, le poids du volume d'air v, à t degrés et à la pression $0^m,76$, est $\frac{1^{gr},3 \times v}{1 + \alpha t}$.

Enfin, le poids d'un même volume d'air étant proportionnel à la pression, on passe de la pression $0^m,76$ à la pression $H - h$, en multipliant la quantité $\frac{1^{gr},3 \times v}{1 + \alpha t}$ par $\frac{H - h}{0,76}$, ce qui donne $\frac{1^{gr},3 \times v\,(H - h)}{(1 + \alpha t) \times 0^m,76}$, pour le poids p' d'un volume d'air v, à la pression $H - h$ et à t degrés. Par conséquent, on a, pour la densité cherchée,

$$D = \frac{p}{p'} = \frac{p\,(1 + \alpha t)\,0^m,76}{1^{gr},3\,v\,(H - h)}.$$

308. **Méthode de M. Dumas.** — Le procédé que nous venons de décrire n'est pas applicable aux liquides dont le point d'ébullition surpasse 150 ou 160 degrés. En effet, pour porter à cette température l'huile dont on remplit alors le manchon, il faut chauffer le mercure qui est dans la marmite à un degré beaucoup plus élevé, auquel il se dégage des vapeurs de mercure qu'il est dangereux de respirer. De plus, dans la cloche graduée, la tension des vapeurs mercurielles tend à s'ajouter à celle de la vapeur sur laquelle on expérimente, ce qui serait une cause d'erreur.

Le procédé suivant, dû à M. Dumas, permet d'opérer jusqu'à la température à laquelle le verre serait déformé, c'est-à-dire environ 400 degrés. L'appareil se compose d'un ballon de verre B à col effilé (fig. 197), d'un demi-litre de capacité environ. Après avoir bien desséché ce ballon intérieurement et extérieurement, on le pèse

tandis qu'il ne contient que de l'air, ce qui donne le poids P du verre. On introduit ensuite, par la pointe effilée, le liquide qu'on veut vaporiser, puis on plonge le ballon dans un bain d'eau saturée de sel, ou dans un bain d'huile de pied de bœuf ou d'alliage de d'Arcet, suivant la température d'ébullition du liquide qui est dans le ballon. Afin de maintenir celui-ci dans le bain, on fixe, sur l'une des anses de la marmite qui le contient, une tige de fer, le long de laquelle peut glisser un support de même métal. Ce support porte deux anneaux entre lesquels est placé le ballon, ainsi que le montre la figure. Sur l'autre anse, une tige semblable à la première porte un thermomètre à poids D.

Fig. 197 (h = 18).

Ayant plongé le ballon et le thermomètre dans le bain, on chauffe un peu au delà de la température d'ébullition du liquide qui est dans le ballon. La vapeur, en se dégageant par la pointe effilée, chasse l'air qui est dans l'appareil. Au moment où cesse le jet de vapeur, ce qui a lieu lorsque tout le liquide est vaporisé, on ferme à la lampe, avec un chalumeau, la pointe effilée du ballon, en ayant soin de noter aussitôt la température du bain et la hauteur du baromètre. Enfin, lorsque le ballon est refroidi et essuyé avec soin, on le pèse de nouveau, et le poids P′ qu'on obtient représente celui de la vapeur qu'il contient, plus le poids du verre, moins celui de l'air déplacé (160). Pour avoir le poids de la vapeur, il faut donc de P′ retrancher le poids du verre, et ajouter à la différence le poids de l'air déplacé, ce qui sera facile après qu'on aura déterminé le volume du ballon.

Pour cela, on plonge la pointe effilée dans le mercure, et on en brise l'extrémité avec une petite pince. Comme la vapeur s'est condensée, le vide s'est fait dans le ballon; d'où il résulte que le mercure s'y précipite par l'effet de la pression atmosphérique, et le remplit complétement si tout l'air en a été expulsé. C'est en versant ensuite, dans une cloche graduée, le mercure qui est entré dans le ballon, qu'on détermine le volume de ce dernier à la température ordinaire. Par le calcul on en déduit facilement le volume du ballon, à la température du bain (264, probl. 5), et, par suite, celui de la vapeur à la même température. Étant ainsi arrivé, par ce procédé, comme par celui de Gay-Lussac, à connaître le poids d'un certain volume de vapeur, à une température et à une pression déterminées, le reste du calcul se fait comme ci-dessus. S'il restait de l'air dans le ballon, celui-ci ne se remplirait pas complétement de mercure, mais le volume du mercure introduit représenterait encore le volume de la vapeur.

Densités de quelques vapeurs par rapport à l'air, un peu au-dessus du point d'ébullition de leur liquide.

Air	1,0000	Vapeur de sulfure de carbone	2,6447
Vapeur d'eau	0,6235	— d'essence de térébenthine	3,0130
— d'alcool	1,6138	— de mercure	6,976
— d'éther sulfurique	2,5860	— d'iode	8,716

309. Rapport entre un volume de liquide et celui de sa vapeur. — La densité d'une vapeur étant connue, on en déduit facilement le volume qu'un poids connu de cette vapeur doit occuper, à l'état de saturation, à une température donnée. Soit proposé, par exemple, de calculer le volume d'un gramme de vapeur d'eau à 100 degrés et à la pression de $0^m,76$.

La densité de la vapeur d'eau, à 100 degrés, étant, par rapport à celle de l'air, 0,6235, on aura le poids d'un litre de vapeur d'eau à 100 degrés et à la pression $0^m,76$, en cherchant le poids d'un litre d'air à la même température et à la même pression, et en multipliant ce poids par $0^m,6235$. Or, on a vu (264, probl. 6) qu'en représentant par P' le poids d'un litre d'air à t degrés, par P le poids du même volume à zéro, et par α le coefficient de dilatation de l'air, on a $P = P'(1 + \alpha t)$; d'où $P' = \frac{P}{1 + \alpha t}$.

Par conséquent, dans le cas que nous considérons, le poids d'un litre d'air sec, à 100 degrés, est

$$\frac{1^{gr},3}{1 + 0,00366 \times 100} = \frac{1^{gr},3}{1,366} = 0^{gr},951$$

par suite, 1 litre de vapeur saturée, à 100 degrés et la pression $0^m,76$, pèse

$$0^{gr},951 \times 0,6235 = 0^{gr},592.$$

Pour avoir, à la même température et à la même pression, le volume V occupé par 1 gramme de vapeur, il n'y a qu'à diviser 1 gr. par $0^{gr},592$; d'où $V = 1$ lit., $689 = 1689$ centimètres cubes. En se transformant en vapeur à 100 degrés et à la pression $0^m,76$, l'eau prend donc un volume près de 1700 fois plus grand qu'à l'état liquide.

CHAPITRE VI.

HYGROMÉTRIE.

310. Objet de l'hygrométrie. — L'*hygrométrie* a pour objet de déterminer la quantité de vapeur d'eau contenue dans un volume d'air déterminé. Cette quantité est très-variable; mais l'air n'est jamais saturé de vapeur d'eau, du moins dans nos climats. Il n'est non plus jamais complétement sec; car si l'on y expose des substances *hygrométriques*, c'est-à-dire ayant une grande affinité pour l'eau, comme le chlorure de calcium, l'acide sulfurique, en tout temps, ces substances absorbent de la vapeur d'eau.

311. État hygrométrique. — L'air n'étant point, en général, saturé, on nomme *état hygrométrique* ou *fraction de saturation* de l'air, le rapport de la quantité actuelle de vapeur d'eau qu'il renferme à la quantité qu'il contiendrait s'il était saturé, la température étant la même dans les deux cas. Le degré d'humidité de l'air ne dépend pas de la quantité absolue de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, mais de la plus ou moins grande distance à

laquelle se trouve l'air de l'état de saturation. L'air, lorsqu'il est froid, peut être très-humide avec peu de vapeur, et très-sec, au contraire, avec une plus grande quantité, lorsqu'il est chaud. Par exemple, l'air contient, en général, plus d'eau l'été que l'hiver, et cependant il est moins humide, parce que la température étant plus élevée, la vapeur est plus loin de son point de saturation. De même, lorsqu'on chauffe un appartement, on ne diminue point la quantité de vapeur qui est dans l'air, mais on diminue l'humidité de celui-ci, parce qu'on recule son point de saturation. L'air peut même devenir alors assez sec pour nuire à l'économie animale; c'est pour cela qu'il est bon de placer sur les poêles des vases contenant de l'eau.

Comme la loi de Mariotte s'applique aux vapeurs non saturées de même qu'aux gaz (282), il en résulte qu'à égalité de température et de volume, le poids de la vapeur, dans un espace non saturé, croît comme la pression, et, par conséquent, comme la tension de cette même vapeur. On peut donc, au rapport des quantités de vapeur, substituer celui des forces élastiques correspondantes, et dire que l'état hygrométrique de l'air est *le rapport entre la force élastique de la vapeur d'eau qu'il contient et la force élastique de la vapeur qu'il contiendrait, à la même température, s'il était saturé.*

Comme conséquence de cette seconde définition, il importe de remarquer que la température ayant varié, l'air peut contenir la même quantité de vapeur, et cependant ne pas avoir le même état hygrométrique. Par exemple, lorsque la température s'élève, la force élastique de la vapeur que contiendrait l'air, à l'état de saturation, croît plus rapidement que la force élastique de la vapeur qui se trouve actuellement dans l'air, et alors le rapport de ces forces, c'est-à-dire l'état hygrométrique, devient plus petit.

On verra bientôt (349) comment de l'état hygrométrique on déduit le poids de la vapeur contenue dans un volume donné d'air.

312. **Différentes espèces d'hygromètres.** — On nomme *hygromètres* des instruments qui servent à déterminer l'état hygrométrique de l'air. On en a imaginé un fort grand nombre qu'on peut rapporter à quatre sortes principales : les hygromètres chimiques, les hygromètres à absorption, les hygromètres à condensation, et les psychromètres.

La méthode du psychromètre consiste à observer simultanément deux thermomètres, l'un sec et l'autre dont le réservoir est constamment mouillé. De la différence de température qu'ils indiquent,

on déduit par le calcul l'état hygrométrique de l'air. Nous ne décrirons pas cet instrument, la formule que son inventeur, M. August, de Berlin, a donnée pour l'appliquer, n'étant pas générale et devant être modifiée suivant les circonstances dans lesquelles se trouve l'appareil.

313. **Hygromètres chimiques.** — Toute substance douée d'une grande affinité pour la vapeur d'eau est un *hygromètre chimique*. On introduit une de ces substances, du chlorure de calcium, par exemple, dans un tube en U; puis on fait communiquer ce tube avec la partie supérieure d'un aspirateur rempli d'eau, comme celui qui fait partie de la figure 200. A mesure que l'eau de l'aspirateur s'écoule, l'air y rentre par le tube qui contient la substance desséchante, et toute la vapeur qui est dans l'air est absorbée par cette substance. Si donc, avant l'expérience, on a pesé le tube avec les matières qui sont dedans, et si on le pèse après, l'augmentation de poids donne la quantité de vapeur d'eau contenue dans un volume d'air égal à celui de l'aspirateur. De ce poids on déduit ensuite, par le calcul, l'état hygrométrique de l'air. Ce procédé est le plus précis, mais il n'offre pas le degré de simplicité nécessaire pour les observations météorologiques.

314. **Hygromètres à absorption.** — Les hygromètres à absorption sont fondés sur la propriété qu'ont les substances organiques de s'allonger par l'humidité et de se raccourcir par la sécheresse. On a imaginé plusieurs hygromètres à absorption. Le plus en usage est l'*hygromètre à cheveu*, ou *hygromètre de Saussure*, du nom du physicien auquel il est dû. Cet instrument se compose d'un cadre de cuivre (fig. 198) sur lequel est tendu un cheveu *c* dégraissé préalablement dans de l'eau contenant un centième de son poids de sous-carbonate de soude. On peut aussi dégraisser le cheveu en le plongeant dans de l'éther sulfurique pendant 24 heures, ainsi que l'a fait M. Regnault. Si le cheveu n'était pas dégraissé, il n'absorberait que peu de vapeur, et son allongement serait très-faible, tandis que, débarrassé de toute matière grasse, il s'allonge rapidement en passant de la sécheresse à l'humidité.

Le cheveu *c* est maintenu, à son bout supérieur, par une pince *a* serrée par une vis de pression *d*. Cette pince s'élève ou s'abaisse, pour tendre le cheveu, au moyen d'une vis *b* dont l'écrou est fixe. Si le cheveu était noué, il en résulterait une torsion qui rendrait l'allongement irrégulier. A sa partie inférieure, il s'enroule sur une poulie *o*, à deux gorges, à laquelle il est fixé. Sur la deuxième gorge s'enroule, en sens contraire du cheveu, un fil de soie qui

supporte un petit poids *p*. L'axe de la poulie porte une aiguille qui se meut sur un cadran gradué. Quand le cheveu se raccourcit, la traction qu'il exerce relève l'aiguille ; lorsqu'il s'allonge, c'est le poids *p* qui la fait descendre.

Pour former la graduation du cadran, on marque zéro au point où, à la température ordinaire, l'aiguille s'arrête dans de l'air complétement desséché, et 100 au point où elle s'arrête dans de l'air saturé de vapeur d'eau ; puis on partage l'intervalle de ces deux points en 100 parties égales, qui sont les degrés de l'hygromètre.

Fig. 198 (h = 27).

Le zéro, ou le point d'extrême sécheresse, se détermine en plaçant l'hygromètre sous une cloche de verre dont on dessèche l'air en y renfermant des substances très-avides d'eau, comme du chlorure de calcium ou du carbonate de potasse calciné. L'air de la cloche perd son humidité, et, par suite, le cheveu se raccourcit et fait tourner la poulie et son aiguille, mais très-lentement. Au bout de quinze à vingt jours seulement, l'aiguille devient stationnaire, ce qui indique que l'air de la cloche est complétement desséché. On marque alors zéro sur le cadran, au point correspondant à l'aiguille.

On obtient la position du point d'extrême humidité, en retirant les matières desséchantes de la cloche, et en mouillant ses parois avec de l'eau distillée. Celle-ci, en se vaporisant, sature bientôt l'air de la cloche, et le cheveu s'allonge rapidement. Le petit poids, dont le fil s'enroule sur la poulie en sens contraire du cheveu, fait alors tourner l'aiguille à l'opposé du zéro. En moins de deux heures elle redevient ainsi stationnaire, et on marque alors 100 au point où elle s'arrête.

D'après Saussure, un cheveu tendu par un poids de 3 décigrammes s'allonge, de zéro à 100, de $\frac{1}{46}$ de sa longueur, qui est d'environ 20 centimètres. Les cheveux blonds paraissent être ceux dont l'allongement est le plus régulier.

On néglige la dilatation qu'éprouve le cheveu par les variations de température, parce qu'on a reconnu que pour une différence de 33 degrés dans la température de l'air, l'allongement du cheveu ne fait varier l'aiguille que des $\frac{3}{4}$ d'un degré de l'hygromètre.

Abstraction faite de cette faible dilatation, on observe que, quelle que soit la température, l'aiguille de l'hygromètre revient toujours exactement au zéro dans l'air parfaitement sec, et à 100 dans l'air saturé. La fixité de ce dernier point montre que, dans l'air saturé, le cheveu absorbe toujours la même quantité d'eau, quelles que soient la température et la densité de la vapeur.

Les hygromètres à cheveu offrent plusieurs inconvénients. Construits avec des cheveux d'espèces différentes, leurs indications peuvent varier de plusieurs degrés, quoique d'accord aux deux points extrêmes. De plus, un même hygromètre ne reste pas comparable à lui-même, parce que le cheveu s'allonge par la tension prolongée du poids qu'il supporte. C'est pourquoi le meilleur système de graduation est un cadran entier, à zéro arbitraire, sur lequel on détermine, de temps en temps, la position des points d'extrême sécheresse et d'extrême humidité. En satisfaisant à ces conditions, l'hygromètre à cheveu présente encore l'inconvénient de ne pas donner immédiatement l'état hygrométrique de l'air. Nous allons faire connaître une table que Gay-Lussac a construite pour déduire l'état hygrométrique de l'air des indications de l'hygromètre à cheveu.

315. **Table de correction par Gay-Lussac.** — L'expérience démontre que les indications de l'hygromètre à cheveu ne sont point proportionnelles à l'état hygrométrique de l'air. Par exemple, lorsque l'aiguille marque 50 degrés, nombre qui correspond au milieu du cadran, l'air est loin d'être à moitié saturé. Il a donc fallu trouver expérimentalement l'état hygrométrique correspondant à chaque degré de l'instrument. Gay-Lussac a résolu ce problème en se fondant sur ce principe (286), que les vapeurs fournies par une dissolution saline ou acide ont une tension maximum d'autant plus faible, pour une même température, que la quantité de sel ou d'acide dissoute est plus considérable.

Cela posé, ce savant plaçait l'hygromètre à cheveu sous une cloche dans laquelle était un mélange d'eau et d'acide sulfurique, et il notait le degré de l'hygromètre, lorsque l'air de la cloche était saturé. Pour obtenir ensuite la tension de la vapeur sous la cloche, il faisait passer dans le vide d'un baromètre quelques gouttes de la même dissolution acide qui était sous la cloche. La dépression du mercure dans le baromètre lui donnait alors la tension de la vapeur dans la cloche, puisqu'à l'état de saturation et à température égale, la force élastique d'une vapeur est la même dans le vide que dans l'air (304, 1°). Cherchant enfin, dans les tables des

forces élastiques (page 265), la tension de la vapeur saturée, à la température de l'air sous la cloche, il avait les deux termes du rapport qui représentait l'état hygrométrique de l'air (311) correspondant au degré marqué par l'hygromètre. C'est en répétant ce mode d'expérience avec des dissolutions acides plus ou moins concentrées, et à la température de 10 degrés, que Gay-Lussac a trouvé dix termes de la table suivante ; les autres termes ont ensuite été déterminés par M. Biot, à l'aide de formules d'interpolation.

États hygrométriques correspondant aux degrés de l'hygromètre à cheveu, à la température de 10 degrés.

DEGRÉS de l'hygromètre.	ÉTATS hygrométriques.	DEGRÉS de l'hygromètre.	ÉTATS hygrométriques.
0	0,000	55	0,318
5	0,022	60	0,363
10	0,046	65	0,414
15	0,070	70	0,472
20	0,094	72	0,500
25	0,120	75	0,538
30	0,148	80	0,612
35	0,177	85	0,696
40	0,208	90	0,791
45	0,241	95	0,891
50	0,278	100	1,000

La table ci-dessus fait voir que ce n'est qu'à 72 degrés que l'air est à moitié saturé. Comme c'est à ce point que correspond, le plus souvent, l'aiguille de l'hygromètre, à la surface du sol, on en conclut que l'air contient, en moyenne, la moitié de la vapeur qu'il contiendrait s'il était saturé. Dans nos climats, l'hygromètre ne descend jamais jusqu'à 100 degrés, même après les pluies les plus abondantes. Pendant les plus grandes sécheresses, il monte rarement au delà de 30 degrés. Lorsqu'on s'élève dans l'atmosphère, il marche, en général, vers zéro. Dans l'ascension aérostatique de Gay-Lussac, à 7000 mètres de hauteur, l'hygromètre marquait 26, nombre qui correspond à peu près à l'état hygrométrique $\frac{1}{6}$.

L'expérience a appris que les hygromètres à cheveu ne sont d'accord que lorsque les cheveux sont de la même espèce et préparés de la même manière ; en sorte qu'il faudrait, pour obtenir des indi-

cations précises, une table particulière pour chaque hygromètre.

* 316. **Hygromètre à condensation de Daniell.** — Les hygromètres à condensation ont pour but de faire connaître, par le refroidissement de l'air, à quelle température la vapeur qu'il contient serait suffisante pour le saturer; tels sont l'hygromètre de Daniell et celui de M. Regnault.

L'*hygromètre de Daniell* se compose de deux boules de verre réunies par un tube deux fois recourbé (fig. 199). La boule A est aux deux tiers remplie d'éther, dans lequel plonge un petit thermomètre renfermé dans le tube. Les deux boules et le tube sont complétement purgés d'air, ce qui s'obtient en faisant bouillir l'éther qui est dans la boule A, tandis que la boule B est encore ouverte, et en fermant celle-ci à la lampe, lorsqu'on juge que les vapeurs d'éther ont entraîné tout l'air; de sorte que le tube et la boule B ne contiennent que de la vapeur d'éther.

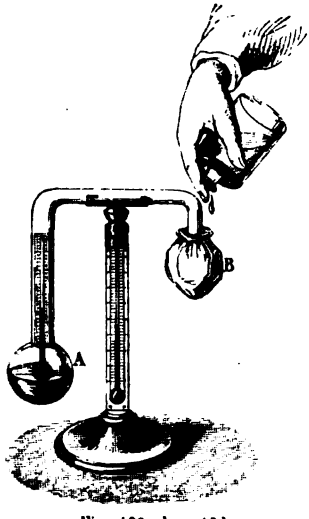


Fig. 199 (h = 18).

Cela posé, la boule B étant enveloppée de mousseline, on verse dessus, goutte à goutte, de l'éther. Ce liquide, en se vaporisant, refroidit la boule (296) et condense les vapeurs qu'elle contient. La tension intérieure étant alors diminuée, l'éther de la boule A donne aussitôt de nouvelles vapeurs qui viennent se condenser de même dans l'autre boule, et ainsi de suite. Or, à mesure que le liquide distille ainsi de la boule inférieure à la boule supérieure, l'éther qui est dans la première se refroidit, et il vient un moment où l'air qui est en contact avec la boule A, et qui se refroidit avec elle, atteint la température à laquelle la vapeur d'eau qu'il contient est suffisante pour le saturer. Cette vapeur se condense alors, et on voit se déposer, sur la boule A, une couche de rosée sous la forme d'un anneau qui entoure la surface du liquide; c'est là, en effet, que se produit surtout le refroidissement dû à l'évaporation. Le thermomètre intérieur indique, à cet in-

stant, la température du *point de rosée*, c'est-à-dire la température de saturation de l'air ambiant.

Pour obtenir ce point avec plus d'approximation, on observe la température au moment où la vapeur précipitée disparaît par le réchauffement, et on prend la moyenne entre cette température et celle de la précipitation. Il est bon que, pendant cette expérience, l'hygromètre soit placé dans un courant d'air, sur une fenêtre ouverte, par exemple, afin que l'évaporation de l'éther sur la mousseline soit plus rapide. Enfin, pour rendre plus visible le dépôt de rosée, on construit ordinairement la boule A en verre noir. Quant à la température de l'air, elle est donnée par un thermomètre placé sur le pied même de l'appareil.

L'hygromètre de Daniell ayant ainsi fait connaître la température à laquelle l'air serait saturé, il s'agit d'en déduire l'état hygrométrique. Pour cela, observons que, dans un espace libre qui contient un mélange d'air et de vapeur, à la pression atmosphérique, lorsque la température baisse, la force élastique de la vapeur reste constante jusqu'au point de saturation. En effet, la force élastique du mélange égale la somme des forces élastiques de chaque fluide (304 2°); or, pendant que l'air se refroidit, sa tension reste invariable, car elle augmente autant par la diminution de volume qu'elle décroît par l'abaissement de température. La tension de la vapeur doit donc aussi demeurer invariable, puisque la force élastique du mélange reste nécessairement égale à la pression de l'atmosphère, après le refroidissement comme avant. Par conséquent, *lorsque l'air se refroidit, la tension de la vapeur qu'il contient reste constante jusqu'au point de saturation, et, à ce point, cette tension est la même qu'avant le refroidissement.*

D'après ce principe, si l'on cherche, dans les tables des forces élastiques, la tension f correspondante à la température du point de rosée, cette tension sera précisément celle que possède la vapeur d'eau qui est dans l'air au moment de l'expérience. Si donc on cherche, dans les mêmes tables, la tension F de la vapeur saturée, à la température de l'air, le quotient de la tension f divisée par la tension F représentera l'état hygrométrique de l'air (344). Par exemple, la température de l'air étant 15 degrés, supposons que le thermomètre de la boule A marque 5 degrés au moment où se fait le dépôt de rosée. En cherchant dans les tables des forces élastiques, les tensions correspondantes à 5 degrés et à 15 degrés, on trouve f égale à $6^{mm},534$, et F égale à $12^{mm},699$; ce qui donne 0,514 pour le rapport de f à F, ou pour l'état hygrométrique.

L'hygromètre de Daniell offre plusieurs causes d'erreur : 1° l'évaporation dans la boule A ne refroidissant le liquide qu'à la surface, le thermomètre qui y plonge ne peut donner avec précision la température du point de rosée ; 2° l'observateur, se tenant auprès de l'appareil, modifie l'état hygrométrique de l'air ambiant, ainsi que sa température.

* 317. **Hygromètre de M. Regnault.** — M. Regnault a construit

Fig. 200 (h = 50).

un hygromètre à condensation qui ne présente pas les causes d'erreur de celui de Daniell. Cet appareil se compose de deux dés d'argent, à parois minces et polies, de 45 millimètres de hauteur et 20 de diamètre (fig. 200). Dans ces dés s'ajustent deux tubes de verre D et E. Chacun d'eux contient un thermomètre très-sensible fixé à l'aide d'un bouchon. Le bouchon du tube D est traversé par un tube A ouvert à ses deux bouts et plongeant jusqu'au fond du dé. Enfin, le tube D est mis en communication, par le pied même du support et par un tuyau de plomb, avec un aspirateur G rempli d'eau. Le tube E ne communique pas avec l'aspirateur ; il contient

seulement un thermomètre destiné à faire connaître la température de l'air.

Cela posé, on verse de l'éther dans le tube D, jusqu'à moitié environ, puis on ouvre le robinet de l'aspirateur. L'eau qui remplit celui-ci s'écoule, et l'air se raréfie dans le tube D. Par l'effet de la pression atmosphérique, de l'air rentre alors par le tube A ; mais comme cet air ne peut pénétrer dans le tube D et dans l'aspirateur qu'en passant au travers de l'éther, il vaporise une partie de ce liquide et le refroidit ainsi d'autant plus vite que l'écoulement est plus rapide. Il vient un moment où le refroidissement détermine sur le dé un dépôt de rosée, de même que dans l'hygromètre de Daniell; le thermomètre T donnant alors la température correspondante, on a les éléments nécessaires pour calculer l'état hygrométrique.

Dans cet instrument, toute la masse d'éther est à la même température, à cause de l'agitation que lui imprime le courant d'air; de plus, les observations se font à distance au moyen d'une lunette; de cette manière, toute cause d'erreur est écartée.

318. **Hygroscopes.** — On nomme *hygroscopes* des appareils qui indiquent bien s'il y a plus ou moins de vapeur d'eau dans l'air, mais qui n'en font pas connaître la quantité. On en construit de plusieurs sortes : les plus employés sont ceux auxquels on donne la forme de petits personnages dont la tête se couvre ou se découvre d'un capuchon selon que l'air est plus ou moins humide. Ces instruments sont fondés sur la propriété qu'ont les cordes et les boyaux tordus de se détordre par l'action de l'humidité, et de se tordre davantage par la sécheresse. Leurs indications sont dues à un petit bout de boyau tordu, fixé par l'une de ses extrémités, tandis que l'autre s'attache à la pièce mobile. Ces hygroscopes sont paresseux, c'est-à-dire que, ne marchant que très-lentement, leurs indications sont toujours en retard sur les variations hygrométriques de l'air; de plus, ils sont fort peu sensibles.

319. **Poids de la vapeur d'eau contenue dans un volume donné d'air.** — Au moyen de la table de Gay-Lussac (page 296), on peut calculer le poids de la vapeur d'eau contenue dans un volume donné d'air, quand on connaît le nombre de degrés marqué par l'hygromètre à cheveu. En effet, soient t la température de l'air, f la tension de la vapeur qu'il contient, F la tension de la vapeur saturée à t degrés, et E l'état hygrométrique fourni par la table de Gay-Lussac :

$$\text{on a } \frac{f}{F} = E; \text{ d'où } f = F \times E.$$

Cette dernière égalité fait connaître f, puisque E est donné par la table des états hygrométriques, et F par celles des forces élastiques. Cela posé, on a vu (264, VI) qu'un

litre d'air sec à t degrés et à la pression 0m,76, pèse $\frac{1gr,3}{1+\alpha t}$; donc, à la pression f, il pèse $\frac{1gr,3}{1+\alpha t} \cdot \frac{f}{0,76}$ (154, prob. III). Mais la densité de la vapeur d'eau est 0,6235, c'est-à-dire sensiblement les $\frac{5}{8}$ de celle de l'air, dans les mêmes conditions de température et de pression; donc, si l'on multiplie par cette fraction le poids qu'on vient d'obtenir, le produit $\frac{1gr,3}{1+\alpha t} \cdot \frac{f}{0,76} \cdot \frac{5}{8}$ est le poids de la vapeur d'eau contenue dans un litre d'air non saturé. Si l'air était saturé, la formule resterait la même; seulement il faudrait remplacer f par F.

Par exemple, soit proposé de trouver le poids de la vapeur contenue dans 1 mètre cube d'air à 10 degrés, l'hygromètre marquant 60. On trouve E = 0,363 et F = 0m,00916; d'où f = 0,0033. Le poids P, de la vapeur contenue dans 1 mètre cube, ou dans 1000 litres, est donc, d'après la formule ci-dessus:

$$P = 1000 \cdot \frac{1gr,3}{1,0366} \cdot \frac{0m,0033}{0m,7600} \cdot \frac{5}{8} = 3gr,4.$$

Si l'on faisait usage de l'hygromètre à condensation, la tension f serait immédiatement connue, au moyen de la température du point de rosée et de la table des tensions, et la formule ci-dessus ne changerait pas.

REMARQUE. — Dans les programmes universitaires, c'est après les vapeurs qu'est placée la théorie de la pluie, de la neige, des vents, et la distribution de la température à la surface du globe : pour ces diverses questions, ainsi que pour la rosée, nous renvoyons le lecteur aux éléments de météorologie qui terminent ce traité.

CHAPITRE VII.

CONDUCTIBILITÉ DES SOLIDES, DES LIQUIDES ET DES GAZ.

320. **Conductibilité des solides.** — La *conductibilité* est la propriété que possèdent les corps de transmettre le calorique plus ou moins facilement dans l'intérieur de leur masse. On admet que ce genre de propagation s'opère par un rayonnement interne de molécule à molécule. Tous les corps ne conduisant pas également le calorique, on appelle *bons conducteurs* ceux qui le transmettent facilement, tels sont surtout les métaux; et on donne le nom de *mauvais conducteurs* à ceux qui offrent une plus ou moins grande résistance à la propagation de la chaleur, tels sont le verre, les résines, les bois, et surtout les liquides et les gaz.

Pour comparer le pouvoir conducteur des solides, Ingenhousz,

médecin hollandais, mort à la fin du siècle dernier, construisit le petit appareil qui porte son nom, et qui est représenté dans la figure 201. C'est une caisse de fer-blanc, à laquelle sont fixées, à l'aide de tubulures et de bouchons, des baguettes de diverses substances, par exemple, de fer, de cuivre, de bois, de verre. Ces baguettes pénètrent de quelques milimètres dans l'intérieur de la caisse, et sont recouvertes de cire jaune qui fond à 61 degrés. La caisse étant remplie d'eau bouillante, on remarque que sur les baguettes métalliques la cire entre bientôt en fusion à une plus ou moins grande distance, tandis que sur les autres on n'observe aucune trace de fusion. Or, le pouvoir conducteur est évidemment d'autant plus grand que la partie sur laquelle la cire a été fondue s'étend plus loin.

Fig. 201 (l = 22).

M. Despretz a mesuré les pouvoirs conducteurs des solides avec l'appareil représenté dans la figure 202. C'est une barre prismatique dans laquelle sont pratiquées, de décimètre en décimètre, de petites

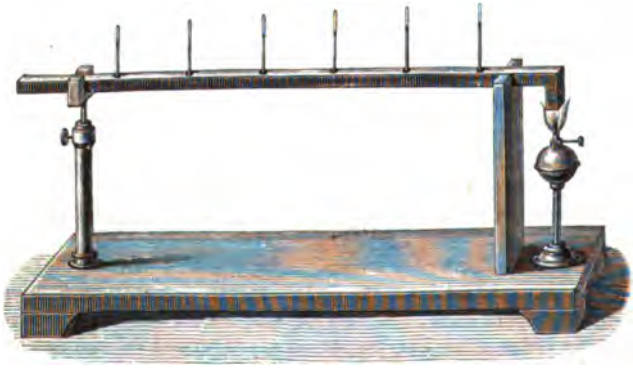


Fig. 202 (l = 84).

cavités remplies de mercure, dans chacune desquelles plonge un thermomètre. Cette barre étant exposée, par l'une de ses extrémités, à une source de chaleur constante, on voit les thermomètres monter successivement, à partir de la source, puis indiquer des températures fixes, mais décroissantes d'un thermomètre au sui-

vant. Par ce procédé, M. Despretz a vérifié la loi suivante, donnée pour la première fois par Lambert de Berlin : *Les distances à la source croissant en progression arithmétique, les excès de température sur l'air ambiant décroissent en progression géométrique.*

Toutefois, cette loi ne se vérifie que pour les métaux très-bons conducteurs, tels que l'or, le platine, l'argent et le cuivre; elle n'est qu'approchée pour le fer, le zinc, le plomb, l'étain, et nullement applicable aux corps non métalliques, comme le marbre, la porcelaine, etc.

En représentant par mille le pouvoir conducteur de l'or, M. Despretz a trouvé que celui des substances suivantes est :

Platine	981	Étain	304
Argent	973	Plomb	179
Cuivre	898	Marbre	24
Fer	374	Porcelaine	12
Zinc	363	Terre de brique	11

* MM. Wiedmann et Franz ont publié, en 1853, dans les annales de Poggendorf, le résultat de longues recherches sur la conductibilité des métaux pour la chaleur. Afin de ne pas altérer la forme des barres métalliques en y pratiquant des cavités comme l'avait fait M. Despretz, ce qui détruisait partiellement la continuité des métaux, ces physiciens ont employé un procédé à l'abri de cette cause d'erreur. Ils ont mesuré la température des barres, en leurs différentes parties, par les courants thermo-électriques qu'ils obtenaient en appliquant sur ces parties le point de soudure d'un élément de la pile thermo-électrique de Melloni (liv. x, chap. viii).

Les barres métalliques étaient aussi régulières que possible, et disposées dans un espace dont la température était constante. Une des extrémités des barres était en communication avec une source de chaleur; et l'élément thermo-électrique qui devait être mis en contact avec les barres avait de très-petites dimensions, afin de leur enlever très-peu de chaleur.

En opérant ainsi, MM. Wiedmann et Franz ont obtenu des résultats notablement différents de ceux de M. Despretz. En représentant par 100 la conductibilité de l'argent, ils ont trouvé pour les autres métaux les nombres suivants :

Argent	100	Acier	11,6
Cuivre	73,6	Plomb	8,5
Or	53,2	Platine	8,4
Étain	14,5	Alliage de Rose	2,8
Fer	11,9	Bismuth	1,8

Les substances organiques conduisent mal le calorique ; quant aux bois, M. de la Rive, à Genève, a fait voir que leur conductibilité est beaucoup plus grande dans le sens des fibres que transversalement, et que les bois les plus denses sont les meilleurs conducteurs. Le son, la paille, la laine, le coton, qui sont des corps

peu denses et formés, pour ainsi dire, de parties discontinues, sont très-mauvais conducteurs.

321. **Conductibilité des liquides.** — La conductibilité des liquides est extrêmement faible, ainsi qu'on peut le démontrer par l'expérience suivante. On place, au fond d'un vase de verre cylindrique D (fig. 203), un petit thermoscope B formé de deux boules de verre réunies par un tube recourbé *m*, dans lequel est un petit index de liquide coloré. Puis, le vase D étant rempli d'eau à la température ordinaire, on plonge en partie, dans ce liquide, un vase de fer-blanc A, dans lequel on a versé de l'eau bouillante ou de l'huile chauffée à deux ou trois cents degrés. Or, on remarque alors que la boule du thermoscope la plus rapprochée du fond du vase A ne s'échauffe que fort peu, l'index *m* ne se déplaçant que d'une quantité peu sensible; d'où l'on conclut la faible conductibilité de l'eau pour la chaleur. D'autres liquides donnent le même résultat.

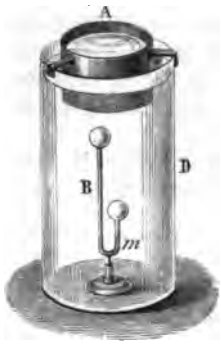


Fig. 203.

En expérimentant avec un appareil analogue à celui qui précède, et en disposant une suite de thermomètres les uns au-dessous des autres dans toute la hauteur du vase D, M. Despretz a trouvé que la chaleur se propage dans les liquides suivant la même loi que dans les barres métalliques, mais que la conductibilité est incomparablement plus faible.

Fig. 204. (h = 34).

322. **Mode d'échauffement des liquides.** — Lorsqu'on chauffe les liquides par leur partie inférieure, il résulte de leur faible conductibilité, que c'est surtout par des courants ascendants et descendants, qui s'établissent dans leur masse, que l'échauffement se produit. Ces courants s'expliquent par la dilatation des couches inférieures, qui, devenues moins denses, s'élèvent dans le liquide et sont remplacées par les cou-

ches supérieures, plus froides, et, par conséquent, plus denses. On rend ces courants visibles en projetant, dans l'eau, de la sciure de bois, qui monte et descend avec eux. Pour cela, on dispose l'expérience comme on le voit dans la figure 204.

323. **Conductibilité des gaz.** — On ne peut apprécier directement le pouvoir conducteur des gaz, à cause de leur grand pouvoir diathermane et de l'extrême mobilité de leurs molécules; mais lorsqu'ils sont gênés dans leurs mouvements, leur conductibilité paraît à peu près nulle. On remarque, en effet, que toutes les substances entre les filaments desquelles de l'air reste stationnaire offrent une grande résistance à la propagation du calorique; tels sont la paille, l'édredon, les fourrures. Quand une masse gazeuse s'échauffe, c'est surtout par son contact avec un corps chaud et par les courants ascendants qui proviennent de la dilatation, de la même manière que dans les liquides.

324. **Applications.** — La plus ou moins grande conductibilité des corps rencontre de nombreuses applications. S'agit-il, par exemple, de conserver un liquide longtemps chaud, on l'enferme dans un vase à double enveloppe dont l'intervalle est rempli de matières non conductrices, comme la sciure de bois, le verre, le charbon pilé, la paille. On emploie le même moyen pour empêcher un corps d'absorber le calorique : c'est ainsi que, pour conserver de la glace dans la saison chaude, on l'entoure de paille ou d'une couverture de laine.

Dans nos habitations, si les carreaux nous paraissent plus froids que le parquet, c'est qu'ils conduisent mieux le calorique. La sensation de chaleur ou de froid que nous ressentons au contact de certains corps est due à la conductibilité. Si leur température est moins élevée que la nôtre, ils nous paraissent plus froids qu'ils ne sont, à cause du calorique qu'ils nous enlèvent en vertu de leur conductibilité : c'est ce qui a lieu pour le marbre. Si, au contraire, leur température est supérieure à celle de notre corps, ils nous semblent plus chauds qu'ils ne sont, par le calorique qu'ils nous cèdent des divers points de leur masse : c'est le phénomène que nous présente une barre de fer exposée au soleil.

CHAPITRE VIII.

CALORIMÉTRIE, THÉORIE DYNAMIQUE DE LA CHALEUR.

325. **Objet de la calorimétrie; calorie.** — L'objet de la *calorimétrie* est de mesurer la quantité de chaleur que les corps cèdent ou absorbent, lorsque leur température s'abaisse ou s'élève d'un nombre de degrés connu, ou lorsqu'ils changent d'état.

On ne peut mesurer la quantité absolue de chaleur perdue ou gagnée par un corps, mais seulement la quantité relative, c'est-à-dire le rapport entre la quantité absolue perdue ou gagnée par le corps et celle que perd ou absorbe un autre corps pour produire le même effet; c'est pourquoi on est convenu de prendre pour *unité de chaleur*, ou *calorie*, la quantité de chaleur nécessaire pour élever de zéro à 1 degré la température d'un kilogramme d'eau.

326. **Calorique spécifique.** — On appelle *calorique spécifique*, ou *capacité calorifique* d'un corps, la quantité de chaleur qu'il absorbe, lorsque sa température s'élève de zéro à 1 degré, comparativement à celle qu'absorberait, dans le même cas, un égal poids d'eau; ce qui revient à prendre pour unité le calorique spécifique de l'eau.

On constate facilement que tous les corps n'ont pas le même calorique spécifique. Si l'on mélange, par exemple, un kilogramme de mercure à 100 degrés avec un kilogramme d'eau à zéro, on observe que la température du mélange est seulement de 3 degrés environ. C'est-à-dire que le mercure s'étant refroidi de 97 degrés, la quantité de chaleur qu'il a perdue n'échauffe que de 3 degrés le même poids d'eau. L'eau absorbe donc, à poids égal, environ 32 fois plus de chaleur que le mercure, pour une même élévation de température.

Trois méthodes ont été employées pour la détermination des caloriques spécifiques : la méthode de la fusion de la glace, celle des mélanges, et celle du refroidissement; dans cette dernière, on calcule le calorique spécifique d'un corps d'après le temps qu'il met à se refroidir d'un nombre de degrés connu. Nous n'exposerons que les deux premières méthodes; mais, auparavant, il importe de faire connaître comment on mesure la quantité de chaleur absorbée par un corps dont la masse et le calorique spécifique sont donnés, lorsque sa température s'élève d'un certain nombre de degrés.

327. **Mesure de la chaleur sensible absorbée par les corps.** — Soient m le poids d'un corps en kilogrammes, c son calorique spécifique et t sa température. La quantité de chaleur nécessaire pour élever de zéro à un degré un kilogramme d'eau, ayant été prise pour unité, il faut m de ces unités pour élever de zéro à 1 degré un poids d'eau de m kilogrammes; et pour élever ce dernier poids de zéro à t degrés, il faut t fois plus, c'est-à-dire mt. Or, puisque telle est la quantité de chaleur nécessaire pour porter de zéro à t degrés m kilogrammes d'eau, dont le calorique spécifique est 1, il est évident que pour un corps de même poids, dont le calorique spécifique est c, il faut c fois mt, ou mtc. D'où l'on conclut que, lorsqu'un corps s'échauffe de zéro à t degrés, *la quantité de chaleur qu'il absorbe peut se représenter par le produit obtenu en multipliant son poids par sa température et par son calorique spécifique.* Ce principe est la base des formules qui vont servir à la détermination des caloriques spécifiques.

Si le corps s'échauffe ou se refroidit de t à t' degrés, la chaleur absorbée ou dégagée sera de même représentée par la formule

$$m\,(t' - t)\,c, \text{ ou } m\,(t - t')\,c.$$

Nous recommandons ces formules à l'attention des élèves; c'est avec elles qu'on résout tous les problèmes sur les caloriques spécifiques.

328. Méthode des mélanges. — Pour calculer, par la méthode des mélanges, le calorique spécifique d'un corps solide, on le pèse et on le porte à une température connue, qu'on détermine en le maintenant un certain temps dans un courant de vapeur à 100 degrés; puis on le plonge dans une masse d'eau froide dont le poids et la température sont également connus. De la quantité de chaleur que le corps cède à l'eau, on déduit ensuite son calorique spécifique.

A cet effet, représentons par M le poids du corps, par T sa température au moment où on le plonge dans le liquide, et par c son calorique spécifique.

De même, soient m le poids de l'eau froide et t sa température.

Enfin, soient m' le poids du vase qui contient l'eau, c' son calorique spécifique, et t sa température, laquelle est évidemment celle de l'eau. Ce vase est, en général, un petit cylindre d'argent ou de laiton, à parois minces et polies.

Dès que le corps chaud est plongé dans le liquide, la température de celui-ci s'élève, et si l'on représente par θ la plus haute température qu'il atteint, on voit que le corps s'est refroidi d'un nombre de degrés représenté par $(T - \theta)$, et qu'il a, par conséquent, perdu une quantité de chaleur qui a pour mesure $Mc\,(T - \theta)$ (327). L'eau et le vase, au contraire, se sont échauffés d'un nombre de degrés égal à $(\theta - t)$, et ont absorbé respectivement des quantités de chaleur égales à $m\,(\theta - t)$ et à $m'c'\,(\theta - t)$, puisque le calorique spécifique de l'eau est l'unité. Or, la quantité de chaleur cédée par le corps chaud est évidemment égale à la somme des quantités de chaleur absorbées par l'eau et par le vase; on a donc l'équation $Mc\,(T - \theta) = m\,(\theta - t) + m'c'\,(\theta - t)$ [1], de laquelle il est facile de tirer la valeur de c, lorsque le calorique spécifique c' du vase est connu. S'il ne l'était pas, on devrait commencer par le déterminer, en plongeant dans l'eau un corps chaud de même matière que le vase, et ayant, par conséquent, le même calorique spécifique. L'équation précédente prend alors la forme

$$Mc'(T - \theta) = m\,(\theta - t) + m'c'(\theta - t) \quad [2],$$

c'est-à-dire qu'elle ne contient plus que l'inconnue c'.

Le calorique spécifique du vase étant connu, pour résoudre l'équation [1] trouvée plus haut, on met dans le second membre $(\theta - t)$ en facteur commun, et il vient alors $Mc\,(T - \theta) = (m + m'c')\,(\theta - t)$ [3]; divisant les deux membres par $M\,(T - \theta)$,

$$\text{on a} \qquad c = \frac{(m + m'c')\,(\theta - t)}{M\,(T - \theta)} \quad [4].$$

On écrit souvent la valeur de c sous cette forme : $c = \dfrac{(m + \mu)\,(\theta - t)}{M\,(T - \theta)}$ [5]; en posant $m'c' = \mu$; c'est-à-dire que μ est le poids d'eau qui absorberait la même quantité de chaleur que le vase; ce qu'on exprime en disant que le vase est *réduit* en eau.

Enfin, pour donner à la méthode des mélanges toute la précision qu'elle comporte, on doit aussi tenir compte de la chaleur absorbée par le verre et le mercure du thermomètre.

Afin de tenir compte des pertes de chaleur dues au rayonnement dans le procédé que nous venons de décrire, on fait d'abord une expérience avec le corps même dont on cherche le calorique spécifique, dans le seul but de connaître approximativement

le nombre de degrés dont la température de l'eau et du vase doit s'élever. Ce nombre étant, par exemple, 10 degrés, on refroidit l'eau et le vase de moitié, c'est-à-dire de 5 degrés au-dessous de la température de l'air ambiant; puis on procède à l'expérience définitive. La température de l'eau s'élevant alors sensiblement de 10 degrés, il en résulte que le vase, dont la température était d'abord de 5 degrés au-dessous de celle de l'enceinte, est, à la fin de l'expérience, de 5 degrés au-dessus. Il y a donc compensation entre la perte et le gain de chaleur qui proviennent du rayonnement pendant l'expérience.

329. **Appareil de M. Regnault pour la méthode des mélanges.** — La figure 205 représente l'appareil qu'a adopté M. Regnault pour la recherche des caloriques spécifiques par la méthode des mélanges.

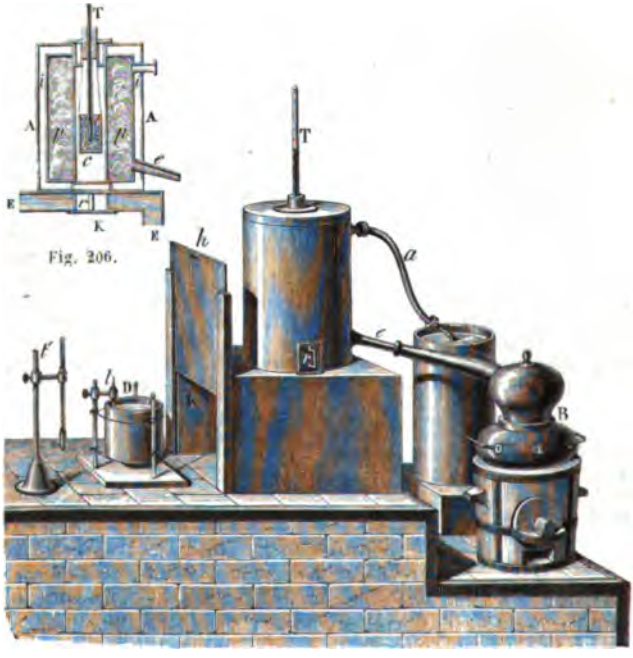


Fig. 205.

La pièce principale de cet appareil est une étuve AA, représentée en coupe dans la figure 206. Elle se compose de trois compartiments cylindriques : dans le compartiment central est suspendu, par des fils de soie, un petit panier *c* en fil de laiton; c'est dans ce panier qu'est placée, en fragments, la substance sur laquelle on veut expérimenter. Un thermomètre T, fixé au centre même de ces fragments, en donne la température. Dans le second compartiment *pp*, circule un courant de vapeur qui arrive,

par un tube *e*, d'un générateur B, et se rend ensuite, par un tube *a*, dans un serpentin où la vapeur se condense. Le troisième compartiment *ii* est rempli d'air destiné à s'opposer à la déperdition de la chaleur. Au-dessous de l'étuve est une chambre K, entourée d'une double paroi EE, formant un réservoir qu'on maintient rempli d'eau froide, afin de s'opposer à la transmission du calorique provenant de l'étuve et du générateur. Enfin le compartiment central de l'étuve est fermé par un registre *r* qu'on ouvre à volonté, et qui permet alors de faire passer le panier *c* de l'étuve dans la chambre K.

Cela posé, à gauche de l'étuve, on voit un petit vase de laiton D, à parois très-minces, lequel est suspendu, par des fils de soie, sur un petit charriot qu'on fait avancer ou reculer à volonté dans la chambre K. Ce vase, qui est destiné à servir de calorimètre, est rempli d'eau, et dans cette eau plonge un thermomètre *t* qui en donne la température. Enfin, un thermomètre *t'*, placé près des appareils, donne la température de l'air ambiant.

Fig. 207. (h = 80).

Fig. 208

L'appareil ainsi disposé, lorsque le thermomètre T indique que la substance placée dans le panier *c* a pris une température stationnaire, ce qui a lieu au bout de deux heures et demie à trois heures, on soulève l'écran *h*, et on fait avancer le vase D juste au-dessous du compartiment central de l'étuve. Tirant alors le registre *r*, on laisse tomber rapidement, dans l'eau du vase D, le panier *c* et les matières qu'il contient, sauf le thermomètre T, qui reste fixé au bouchon qui le soutient. Retirant aussitôt le chariot et le vase D, on agite l'eau de celui-ci jusqu'à ce que le thermomètre *t* devienne stationnaire. La température qu'il indique alors est celle représentée par θ dans la formule du paragraphe précédent. Cette température connue, le reste du calcul s'opère comme il a été dit ci-dessus. Toutefois, on tient compte de la chaleur cédée au calorimètre par le panier de laiton; M. Regnault a tenu compte, en outre, de celle qui est absorbée par le milieu ambiant.

330. **Méthode de la fusion de la glace.** — La méthode que nous allons décrire est fondée sur le calorique latent absorbé par la glace qui se fond, quantité de chaleur qui, ainsi qu'on le verra bientôt (336), est de 79 unités pour 1 kilogramme de glace. L'appareil employé dans cette méthode est dû à Lavoisier et à Laplace, et se désigne sous le nom de *calorimètre de glace*. La figure 207 le représente vu extérieurement, et la figure 208 en montre une coupe. Cet appareil est formé de trois enveloppes concentriques en fer-blanc. Dans celle du centre se trouve le corps M (fig. 208), dont on cherche le calorique spécifique; les deux autres compartiments sont remplis de glace pilée. La glace du compartiment A est destinée à être fondue par le corps

chaud, et celle du compartiment B n'a pour but que d'arrêter le calorique qui rayonne de l'enceinte sur l'appareil. Deux robinets D et E servent à l'écoulement de l'eau provenant de la fusion de la glace.

Pour trouver le calorique spécifique d'un corps solide, au moyen de ce calorimètre, on détermine d'abord le poids m de ce corps, en kilogrammes, puis on le porte à une température connue t, en le maintenant quelque temps dans un bain chaud d'eau ou d'huile, ou dans un courant de vapeur; on le porte ensuite rapidement dans l'enveloppe centrale, on remet aussitôt les couvercles et on les recouvre de glace, comme le montre la figure. On recueille alors l'eau qui s'écoule par le robinet D, et lorsque l'écoulement est arrêté, on en détermine le poids P, en kilogrammes, poids qui représente évidemment celui de la glace fondue. Or, puisque 1 kilogramme de glace, en se fondant, absorbe 79 unités de chaleur, P kilogrammes ont absorbé P fois 79 unités. D'un autre côté, cette quantité de chaleur est nécessairement égale à celle qui a été cédée par le corps M pendant qu'il s'est refroidi de t degrés à zéro, c'est-à-dire à mtc (327); car on admet comme évident qu'en se refroidissant de t degrés à zéro, un corps cède précisément la quantité de chaleur qu'il avait absorbée pour s'échauffer de zéro à t degrés. On a donc l'égalité

Fig. 209.

$$mtc = 79\,P; \qquad \text{d'où } c = \frac{79\,P}{mt}.$$

La méthode du calorimètre de glace offre plusieurs causes d'erreur. La principale est qu'une partie de l'eau provenant de la fusion reste adhérente à la glace qui n'a pas été fondue ; le poids P ne peut donc être évalué exactement. De plus, l'air extérieur qui pénètre dans le calorimètre par les robinets, augmente la quantité de glace fondue. On remédie en partie à ces inconvénients en substituant au calorimètre le *puits de glace*. On nomme ainsi un trou qu'on pratique dans un morceau de glace compacte, au moyen d'un fer chaud, et dans lequel on place le corps dont on cherche le calorique spécifique, après l'avoir chauffé à une température connue (fig. 209). Ayant d'avance dressé les bords du trou avec un fer chaud, on le recouvre d'un morceau de glace aussi dressé avec soin, de manière qu'il ferme exactement. Lorsqu'on juge que le corps est refroidi jusqu'à zéro, on le retire ainsi que l'eau de fusion, et le poids de celle-ci étant déterminé, il ne reste plus qu'à le substituer dans la formule précédente.

331. **Calorique spécifique des liquides.** — Le calorique spécifique des liquides peut se déterminer également par la méthode du refroidissement, par celle des mélanges, ou par celle du calorimètre de Lavoisier et de Laplace. Seulement, dans cette dernière méthode, ils doivent être renfermés dans un petit vase de fer-blanc ou dans des tubes de verre qui se placent dans le compartiment M.

En comparant entre eux les nombres du tableau ci-dessous, on voit que l'eau et l'essence de térébenthine ont un calorique spécifique beaucoup plus grand que celui des autres substances et surtout des métaux. Cette propriété est générale pour les liquides. C'est parce que l'eau a un grand calorique spécifique qu'elle met beaucoup de temps à s'échauffer et à se refroidir, et qu'elle absorbe alors ou cède beaucoup plus de chaleur qu'une autre substance, à masse et à température égales. Cette double

propriété est utilisée dans la trempe de l'acier, et dans le chauffage à circulation d'eau chaude dont nous parlerons plus tard (391).

332. **Caloriques spécifiques moyens des solides et des liquides, entre zéro et 100 degrés.** — M. Regnault a calculé, par la méthode des mélanges et par celle du refroidissement, le calorique spécifique d'un grand nombre de corps. Nous donnons ici les nombres qu'il a obtenus, par la première méthode, pour les corps qu'on rencontre le plus fréquemment dans les arts.

SUBSTANCES.	CALORIQUES spécifiques.	SUBSTANCES.	CALORIQUES. spécifiques.
Eau	1,0080.	Nickel	0,10863
Essence de térébenth.	0,42590	Cobalt	0,10696
Noir animal calciné	0,26085	Zinc	0,09555
Charb. de bois calciné.	0,24111	Cuivre	0,09515
Soufre	0,20259	Laiton	0,09391
Graphite	0,20187	Argent	0,05701
Verre des thermomèt.	0,19768	Étain	0,05623
Phosphore	0,18949	Antimoine	0,05077
Diamant	0,14687	Mercure	0,03332
Fonte blanche	0,12983	Or	0,03244
Fer	0,11379	Platine laminé	0,03243
Acier doux	0,1165.	Bismuth	0,03084

Les nombres compris dans cette table représentent les caloriques spécifiques moyens entre zéro et 100 degrés; il résulte, en effet, des travaux de Dulong et Petit sur la chaleur, que les caloriques spécifiques augmentent avec la température. Ceux des métaux, par exemple, sont plus grands entre 100 et 200 degrés, qu'entre zéro et 100 degrés, et plus grands encore de 200 à 300 degrés. C'est-à-dire que, pour élever la température d'un corps de 200 à 250 degrés, il faut plus de chaleur que pour l'élever de 100 à 150 degrés, et, dans ce dernier cas, plus que pour l'élever de zéro à 50 degrés.

En un mot, l'augmentation du calorique spécifique avec la température est d'autant plus sensible que les corps sont plus près de leur point de fusion. Au contraire, toute action qui augmente la densité des corps et leur agrégation moléculaire, diminue le calorique spécifique.

Quant aux liquides, leur calorique spécifique augmente avec la température encore beaucoup plus rapidement que celui des solides. L'eau, cependant, fait exception, son calorique spécifique augmentant beaucoup moins que celui des autres liquides.

Enfin, une même substance possède, à l'état liquide, un plus grand calorique spécifique qu'à l'état solide; et, à l'état gazeux, le calorique spécifique est encore plus grand qu'à l'état liquide.

* 333. **Loi de Dulong et Petit sur les caloriques spécifiques des atomes.** — En 1819, Dulong et Petit firent connaître cette loi remarquable, que le produit du calorique spécifique des corps simples par leur poids atomique est le même pour tous les corps et égal à 37; loi qui peut s'énoncer en disant que, *pour les corps simples, les caloriques spécifiques sont en raison inverse des poids atomiques.*

M. Regnault, après avoir déterminé avec beaucoup de soin les caloriques spécifiques

d'un grand nombre de corps, a trouvé que le produit du poids atomique par le calorique spécifique n'est pas rigoureusement constant, comme l'avaient annoncé Dulong et Petit, mais que ce produit varie entre 38 et 42, variation qui peut résulter de ce que les caloriques spécifiques ne sont pas déterminés à des distances égales du point de fusion des corps.

M. Regnault a été conduit en outre aux deux lois suivantes sur les caloriques spécifiques des corps composés et des alliages :

1° *Dans les corps composés, ayant même formule atomique, le calorique spécifique est en raison inverse du poids atomique.*

2° *Pour des températures un peu éloignées du point de fusion, le calorique spécifique des alliages est exactement la moyenne des caloriques spécifiques des métaux composants.*

* 334. **Calorique spécifique des gaz.** — On rapporte le calorique spécifique des gaz à celui de l'eau ou à celui de l'air : dans le premier cas, il représente la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré un poids donné de gaz, comparativement à celle qui serait nécessaire au même poids d'eau ; dans le second, la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré un volume donné de gaz, comparativement à celle qu'il faudrait pour le même volume d'air.

Dans cette dernière manière de considérer les caloriques spécifiques des gaz, on peut, en outre, supposer ceux-ci à *pression constante* et à volume variable; ou bien à *volume constant*, sous une pression variable.

Les caloriques spécifiques des gaz par rapport à l'eau ont été déterminés en 1812 par Delaroche et Bérard. Pour cela, on mesurait la quantité de chaleur cédée à un poids connu d'eau par un poids aussi connu de gaz, qui circulait dans un serpentin placé dans le liquide. On en déduisait ensuite le calorique spécifique du gaz à l'aide d'un calcul analogue à celui qui a été donné pour la méthode des mélanges.

Les mêmes physiciens ont déterminé les caloriques spécifiques des gaz, à pression constante, par rapport à l'air, en comparant entre elles les quantités de chaleur cédées à un même poids d'eau par des volumes égaux de gaz et d'air, à la même température et à la pression atmosphérique pendant toute l'expérience. Depuis les travaux de Delaroche et Bérard, MM. de la Rive et Marcet, en 1835, ont appliqué la méthode du refroidissement à la même détermination.

Enfin, les caloriques spécifiques des gaz, à volume constant, toujours par rapport à l'air, ont été calculés par Dulong en s'appuyant sur une formule qui fait connaître la vitesse de propagation du son dans les différents gaz.

D'après les calculs de Laplace et de Poisson, et les expériences de Clément et Désormes, de Delaroche et Bérard, de Gay-Lussac et de Dulong, on avait admis jusqu'ici que le calorique spécifique des gaz à pression constante est toujours plus grand qu'à volume constant. Mais, dans un travail récent et par une méthode entièrement nouvelle, M. Regnault a trouvé que la différence entre ces deux espèces de caloriques spécifiques est nulle ou extrêmement petite.

335. **Mesure du calorique latent de fusion.** — On a vu (271) que lorsque les corps passent de l'état solide à l'état liquide, il y a absorption d'une quantité de chaleur latente plus ou moins considérable ; il nous reste à faire connaître comment on mesure la quantité de chaleur absorbée alors par l'unité de poids. Cette question se résout par la méthode des mélanges, en s'appuyant toutefois sur ce principe, qui paraît évident, que, lorsqu'un corps à l'état liquide se solidifie, il dégage une quantité de chaleur absolument égale à celle qu'il avait absorbée pendant la fusion.

Soit proposé, par exemple, de déterminer le calorique de fusion du plomb. On fond un poids M de ce corps, et après en avoir pris la température T, on le verse dans une masse d'eau dont on connaît le poids m et la température t. Cela posé, représentons

par c le calorique spécifique du plomb, par x son calorique de fusion, c'est-à-dire la quantité de chaleur latente absorbée par l'unité de poids en se fondant, ou, ce qui est la même chose, celle qui est restituée au moment de la solidification; enfin, soit θ la température finale que prend l'eau échauffée par le plomb.

La masse d'eau s'étant échauffée de t à θ degrés, elle a absorbé une quantité de chaleur représentée par $m(\theta - t)$ (327); d'un autre côté, la masse de plomb, en se refroidissant de T à θ a cédé, d'une part, une quantité de chaleur $Mc(T - \theta)$, de l'autre, au moment de la solidification, elle dégage une quantité de chaleur représentée par Mx. On a donc l'équation

$$Mc(T - \theta) + Mx = m(\theta - t),$$

$$\text{d'où} \qquad x = \frac{m(\theta - t) - Mc(T - \theta)}{M}.$$

336. **Calorique de fusion de la glace.** — Le calorique de fusion de la glace est celui dont la connaissance présente le plus d'intérêt par les applications qu'on peut en faire. Il se détermine encore par la méthode des mélanges. Pour cela, soient M un poids de glace à zéro, et m un poids d'eau chaude à t degrés, suffisant pour fondre toute la glace. On projette celle-ci dans l'eau, et aussitôt que la fusion est complète, on mesure la température finale du mélange. Si on la représente par θ, l'eau, s'étant refroidie de t degrés à θ, a cédé une quantité de chaleur égale à $m(t - \theta)$. Quant à la glace, si l'on représente par x son calorique de fusion, elle absorbe, pour se fondre, une quantité de chaleur Mx; mais en outre, après la fusion, l'eau qui en provient s'échauffe, et sa température s'élève de zéro à θ degrés; elle absorbe donc alors une quantité de chaleur $M\theta$. Donc, enfin, on a l'équation

$$Mx + M\theta = m(t - \theta);$$

d'où l'on tire la valeur de x.

Par ce procédé, et en évitant avec le plus grand soin toutes les causes d'erreur, MM. la Provostaye et Desains ont trouvé que le calorique de fusion de la glace est 79; c'est-à-dire que 1 kilogramme de glace, qui se fond, absorbe, à l'état de calorique latent, la quantité de chaleur qui serait nécessaire pour élever 79 kilogrammes d'eau de zéro à 1 degré, ou, ce qui est la même chose, 1 kilogramme d'eau de zéro à 79 degrés.

M. Person, qui a fait de nombreuses recherches sur les caloriques latents, a trouvé expérimentalement les nombres suivants pour les caloriques latents de plusieurs corps simples et composés.

Eau	79,25	Bismuth	12,64
Azotate de soude	62,97	Soufre	9,37
Zinc	28,13	Plomb	5,37
Argent	21,07	Phosphore	5,03
Étain	14,25	Alliage de Darcet	4,50
Cadmium	13,66	Mercure	2,83

337. **Mesure du calorique latent de vaporisation.** — On a vu (296) que les liquides, en se vaporisant, rendent latente une quantité de chaleur très-considérable, qu'on désigne sous le nom de calorique d'élasticité ou de calorique de vaporisation. Pour déterminer la quantité de chaleur absorbée alors par l'unité de

poids des différents liquides, on admet comme évident qu'une vapeur qui se liquéfie rend libre une quantité de calorique précisément égale à celle qu'elle avait absorbée en se vaporisant.

Cela posé, la méthode qu'on emploie est la même que pour la détermination des caloriques spécifiques des gaz par rapport à celui de l'eau. La figure 210 représente l'appareil employé dans ce genre de recherches par M. Despretz. La vapeur se produit dans une corne C, où sa température est indiquée par un thermomètre ; elle se rend dans un serpentin SS plongé dans de l'eau froide. Là, elle se condense et cède au serpentin et à l'eau du vase B son calorique latent. L'eau qui résulte de la condensation se recueille dans un vase A, et son poids fait connaître le poids de la vapeur qui a traversé le serpentin. Enfin, des thermomètres placés dans le vase B indiquent l'élévation de température de l'eau.

Fig. 210.

Cela posé, soient M le poids de la vapeur condensée, T sa température à son entrée dans le serpentin, et x son calorique de vaporisation. Soient de même m le poids de l'eau dans laquelle plonge le serpentin, y compris celui du vase B et du serpentin réduits en eau (328), t la température initiale de l'eau, et θ sa température quand on arrête l'expérience.

Pour mesurer la chaleur cédée par la vapeur, observons qu'au commencement de l'expérience l'eau provenant de la condensation sort à t degrés, tandis qu'à la fin, elle sort à θ; d'où il résulte qu'on peut admettre qu'elle sort, pendant toute l'expérience, à une température moyenne entre t et θ, c'est-à-dire à une température représentée par $\frac{t+\theta}{2}$. Le poids M de vapeur a donc cédé, après sa condensation, une quantité de chaleur égale à $M\left(T - \frac{t+\theta}{2}\right)$; mais de plus, au moment de sa liquéfaction, la vapeur dégage une quantité de chaleur représentée par Mx. D'ailleurs, la chaleur absorbée par l'eau froide, le serpentin et le vase, est $m(\theta - t)$; on a donc

$$Mx + M\left(T - \frac{t+\theta}{2}\right) = m(\theta - t).$$

Cette équation fait connaître x. M. Despretz a trouvé ainsi pour le calorique d'élasticité de la vapeur d'eau, à 100°, le nombre 540; c'est-à-dire que 1 gramme d'eau, à 100 degrés, absorbe en se vaporisant, la quantité de chaleur nécessaire pour élever 540 grammes d'eau de zéro à 1 degré. M. Regnault a trouvé 537, et MM. Favre et Silbermann 535,8.

338. **Problèmes sur les caloriques spécifiques et sur les caloriques latents.** — 1. Dans un vase de verre pesant 12 grammes et contenant 0 lit., 15 d'eau à 10 degrés, on projette un morceau de fer dont le poids est 20 grammes et la température 98 degrés; la température de l'eau montant alors à 11°,29, on demande le calorique spécifique du fer, sachant que celui du verre est 0,19768?

Ce problème se résout au moyen de la formule [3] du paragraphe 328, en y remplaçant les lettres M, m, m', c', t et θ, par les nombres qui leur correspondent dans l'énoncé ci-dessus. Quant au poids de l'eau, on l'obtient en observant que 1 litre d'eau pesant 1 kilogramme, 0 lit., 15, ou, ce qui est la même chose, 0 lit., 150, pèse 150 grammes.

Cela posé, en faisant les substitutions dans la formule indiquée, il vient

$$20\,(98 - 11{,}29)\,c = (150 + 12 \times 0{,}19768)\,(11{,}29 - 10)$$

$$\text{d'où } c = 0{,}113.$$

II. Une masse de platine, pesant 40 grammes, est placée dans un four et y reste assez longtemps pour en prendre la température; en étant ensuite retirée et plongée dans une masse d'eau dont le poids est 84 grammes et la température 12 degrés, on observe que l'eau s'échauffe jusqu'à 22 degrés : on demande la température du four, sachant que le calorique spécifique du platine est 0,03243 ?

Si l'on représente par t la température cherchée, le nombre d'unités de chaleur cédées par le platine, en se refroidissant de t degrés à 22, est $40 \times (t - 22) \times 0{,}03243$, d'après la formule $m\,(t' - t)\,c$ du paragraphe 327. De même, le nombre d'unités de chaleur absorbées par l'eau, dont le calorique spécifique est 1, pour s'échauffer de 12 degrés à 22, est 84 (22 − 12), ou 840. Or, la quantité de chaleur absorbée par l'eau étant nécessairement la même que celle qui est perdue par le platine, on a

$$40 \times (t - 22) \times 0{,}03243 = 840, \text{ d'où } t = 669 \text{ degrés.}$$

Il est à observer que cette valeur de t n'est qu'approximative, car le nombre 0,03243 est le calorique spécifique du platine entre zéro et 100 degrés; mais on a vu qu'à une température plus élevée il est plus grand (332); par conséquent, le nombre 669 est trop fort.

III. Ayant pratiqué une cavité dans un morceau de glace, on y enferme une masse d'étain qui pèse 55 grammes, et dont la température a été portée préalablement à 100 degrés. Quel sera le poids de glace fondue, sachant que le calorique spécifique de l'étain est 0,05623 et que le calorique de fusion de la glace est 79 ?

L'étain, se refroidissant ici de 100 jusqu'à zéro, perd un nombre d'unités de chaleur représenté par $55 \times 100 \times 0{,}05623$, toujours d'après la formule mtc (327). Or, 1 kilogramme de glace, à zéro, absorbant, pour se fondre, 79 unités de chaleur (336), x kilogrammes de glace absorbent un nombre d'unités représenté par $79 \times x$. On a donc

$$79\,x = 55 \times 100 \times 0{,}05623, \text{ d'où } x = 38^{\text{gr}},9.$$

IV. Quel est le poids de glace à projeter dans 9 litres d'eau pour les refroidir de 20 degrés à 5 ?

Soit M le poids cherché, en kilogrammes; ce poids absorbera pour se fondre, un nombre d'unités de chaleur représenté par 79 M (336); mais le poids d'eau M qui en résulte, étant à zéro au moment de la fusion, et devant s'échauffer de 5 degrés, absorbe une quantité de chaleur 5M; par conséquent la chaleur totale absorbée est 79M + 5M, ou 84M. Quant à la chaleur cédée par les 9 litres d'eau, en se refroidissant de 20 degrés à 5, elle est 9 (20 − 5) ou 135. Donc enfin,

$$84\text{M} = 135, \text{ d'où } \text{M} = 1^{\text{kil}},607.$$

V. Quel est le poids de vapeur d'eau, à 100 degrés, nécessaire pour échauffer, en se condensant, 208 litres d'eau de 14 degrés jusqu'à 32 ?

Soit p ce poids en kilogrammes; le calorique latent de la vapeur d'eau étant 540

(337), p kilogrammes de vapeur, en se condensant, cèdent une quantité de chaleur représentée par $540 \times p$. et fournissent p kilogrammes d'eau à 100 degrés. Or, cette eau, en se refroidissant ensuite jusqu'à 32 degrés, cède elle-même une quantité de chaleur égale à p (100 — 32), ou 68 p. D'ailleurs, les 208 litres qui s'échauffent de 14 degrés à 32, pesant 208 kilogrammes, ils absorbent une quantité de chaleur égale à 208 (32 — 14) ou 3744 unités; on a donc

$$540\,p + 68\,p = 3744, \text{ d'où } p = 6^{\text{kil}},158.$$

VI. Dans un premier vase, on a de l'eau à 11 degrés; dans un second, de l'eau à 91; combien doit-on prendre de litres dans chacun d'eux pour former un bain de 250 litres à 31 degrés?

Soient x et y les nombres de litres à prendre respectivement dans chaque vase, on a d'abord $x + y = 250$ [1]. On obtient une deuxième équation en x et en y, en observant que x litres à 11 degrés contiennent $11x$ unités de chaleur, et que y litres à 91 degrés en contiennent un nombre représenté par $91y$. D'ailleurs, les 250 litres de mélange, à 31 degrés, renferment 250×31, ou 7750 unités; on a donc l'équation $11x + 91y = 7750$ [2].

Les équations [1] et [2] étant résolues, on trouve $x = 187$ lit.,5, et $y = 62$ lit.,5.

* THÉORIE DYNAMIQUE DE LA CHALEUR.

339. **Équivalent mécanique de la chaleur.** — Partant de l'idée que le développement de la chaleur est dû à un mouvement vibratoire des molécules, soumis aux lois ordinaires de la mécanique, plusieurs géomètres et physiciens travaillent depuis quelques années au développement d'une théorie nouvelle qu'ils désignent sous le nom de *Théorie dynamique de la chaleur*, et dans laquelle ils se proposent non-seulement de faire voir qu'une quantité de chaleur donnée peut se transformer en travail mécanique (376) et réciproquement, mais de calculer le travail mécanique que peut produire une quantité de chaleur déterminée, ou quelle quantité de chaleur peut développer un certain travail mécanique. On sait, en effet, que la chaleur peut produire un travail mécanique, comme il arrive dans l'expansion des vapeurs et dans la dilatation des gaz; et que réciproquement on peut développer de la chaleur par une action mécanique, telle que la percussion, la pression ou le frottement (378 et 379). La théorie dynamique de la chaleur est pleine d'actualité, et mérite de fixer l'attention des physiciens et des mécaniciens, car elle peut apporter des améliorations de la plus haute importance aux machines à vapeur et aux machines à air chaud.

Montgolfier paraît être le premier physicien qui ait avancé qu'il y a identité de nature entre le calorique et le mouvement, en ce sens non-seulement que la chaleur est une cause de mouvement, et le mouvement une cause de chaleur; mais en ce sens encore que la chaleur et le mouvement sont deux formes différentes, deux effets d'une seule et même cause; en un mot que la chaleur peut se convertir en mouvement et le mouvement en chaleur.

Se basant sur ces considérations théoriques, Montgolfier inventa, en 1800, une machine qu'il appela *pyro-bélier*, au moyen de laquelle, pensait-il, le travail journalier d'un cheval-vapeur (376) ne devait plus demander qu'une dépense de quelques centimes. Le principe du pyro-bélier consistait à dilater par la chaleur une certaine quantité d'air, toujours la même, enfermée en vase clos; à faire servir cette augmentation de volume et d'élasticité à soulever une colonne d'eau; puis à restituer à cette même masse d'air la chaleur dépensée par la dilatation et *convertie en effet mécanique*, pour lui restituer la force élastique perdue; et ainsi de suite.

M. Séguin aîné, neveu de Montgolfier, a présenté à l'Institut (le 3 janvier 1855) un mémoire dans lequel il décrit une nouvelle machine à vapeur fondée sur les idées théoriques ci-dessus.

En 1821, S. Carnot publia un ouvrage intitulé *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, dans lequel on trouve des considérations fort remarquables sur la manière de produire de la force motrice avec de la chaleur. Depuis, la théorie dynamique de la chaleur a été le sujet des travaux de plusieurs savants, et particulièrement de MM. Joule, Thomson et Rankins en Angleterre, de MM. Meyer et Clausius en Allemagne, et de MM. E. Clapeyron, Reech et Regnault en France.

Carnot admettait que, dans une machine à vapeur, le travail mécanique produit est uniquement dû au *passage* de la chaleur, dans la machine, de la chaudière au condenseur (369); la quantité de chaleur possédée par la vapeur à son entrée dans les cylindres se retrouvant en entier dans la vapeur qui en sort. Dans la nouvelle théorie la quantité de chaleur qui entre dans la machine ne se conserve pas tout entière à l'état de chaleur; une partie disparaît pendant son passage, pour se *convertir* en effet mécanique, et, dans tous les cas, le travail mécanique développé est proportionnel à la quantité de chaleur qui a disparu.

Dans cette théorie, M. Joule a nommé *équivalent mécanique de la chaleur* la quantité de travail qu'une unité de chaleur (325) peut produire; ou, ce qui revient au même, la quantité de travail mécanique nécessaire pour développer une unité de chaleur. Par de nombreuses expériences, M. Joule a trouvé 424 kilogrammètres (376) pour l'équivalent mécanique de la chaleur; c'est-à-dire que la quantité de chaleur nécessaire pour échauffer de 1 degré 1 kilogramme d'eau, peut développer une force motrice capable d'élever un poids de 424 kilogrammes à 1 mètre de hauteur par seconde. Ne pouvant décrire ici les expériences de M. Joule, nous renvoyons le lecteur aux *Archives des sciences physiques et naturelles de Genève* (mai 1854, p. 37).

En traitant des courants d'induction, nous ferons connaître une belle expérience faite récemment par M. Foucault, dans laquelle cet habile physicien transforme d'une manière remarquable un effet dynamique en chaleur.

CHAPITRE IX

RAYONNEMENT DU CALORIQUE.

340. **Propagation du calorique dans un milieu homogène.** — Lorsqu'un corps est placé dans une enceinte dont la température est plus ou moins élevée que la sienne, on observe toujours que la température du corps s'élève ou s'abaisse progressivement, jusqu'à ce qu'elle ait atteint celle de l'enceinte; d'où l'on conclut que le corps a gagné ou perdu une certaine quantité de chaleur qu'il a reçue des corps voisins ou qu'il leur a cédée. La chaleur se transmet donc d'un corps à un autre, à travers l'espace, de la même manière que la lumière. Le calorique qui se propage ainsi à distance se désigne sous le nom de *calorique rayonnant*, et on appelle *rayon de chaleur* ou *rayon calorifique*, la ligne droite que suit le calorique en se propageant.

La chaleur se transmet aussi dans la masse même des corps : c'est alors un véritable rayonnement intérieur de molécule à molécule qui se produit, phénomène qui a déjà été étudié (320) sous le nom de *conductibilité*.

341. **Lois du rayonnement.** — Le rayonnement du calorique présente les trois lois suivantes :

1° *Le rayonnement a lieu dans toutes les directions autour des corps*. En effet, si l'on place un thermomètre dans différentes positions autour d'un corps chaud, il indique, dans toutes, une élévation de température.

2° *Dans un milieu homogène, le rayonnement se fait en ligne droite*. Car, si l'on interpose un écran sur la droite qui joint une source calorifique à un thermomètre, celui-ci cesse d'être influencé par la source.

Mais en passant d'un milieu dans un autre, de l'air dans le verre, par exemple, les rayons calorifiques, de même que les rayons lumineux, sont généralement déviés, phénomène qu'on désigne sous le nom de *réfraction*, et dont on verra les lois en optique, ces lois étant les mêmes pour la lumière que pour le calorique.

3° *Le calorique rayonnant se propage dans le vide comme dans l'air*. On le démontre en fixant un petit thermomètre dans un ballon de verre où l'on fait le vide. Si on l'approche alors d'un corps chaud, on voit le thermomètre monter, phénomène qui ne peut être attribué qu'au rayonnement dans le vide ; car on a vu (320) que le verre ne conduit pas assez bien le calorique pour que la propagation puisse s'opérer par les parois du ballon et par la tige du thermomètre.

Quant à la vitesse de propagation du calorique, elle n'a pas été déterminée : on sait seulement qu'elle doit peu différer de celle de la lumière, si elle ne lui est pas exactement égale, car la lumière solaire et la plupart des lumières artificielles sont constamment accompagnées de rayons de chaleur.

342. **Causes qui font varier l'intensité du calorique rayonnant.** — En prenant pour *intensité du calorique* la quantité de chaleur reçue sur l'unité de surface, on trouve que trois causes peuvent modifier cette intensité : la température de la source de chaleur, sa distance, et l'obliquité des rayons calorifiques par rapport à la surface qui les émet. On observe, en effet, les trois lois suivantes sur l'intensité du calorique rayonnant :

1° *L'intensité du calorique rayonnant est proportionnelle à la température de la source ;*

2° *Cette même intensité est en raison inverse du carré de la distance;*

3° *L'intensité des rayons calorifiques est d'autant moindre qu'ils sont émis dans une direction plus oblique par rapport à la surface rayonnante.*

On démontre la première loi en présentant une des boules d'un thermomètre différentiel (241) à des sources de chaleur variables, par exemple, à un cube de fer-blanc rempli successivement d'eau à 30 degrés, à 20 degrés et à 10 degrés. On remarque alors qu'à distance égale le thermomètre marque des températures qui sont dans le même rapport que celles du cube, par exemple. comme 6, 4, 2 (344, 2°).

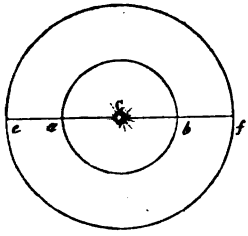


Fig. 211.

Pour démontrer expérimentalement la seconde loi, on place le thermomètre différentiel à une certaine distance d'une source de chaleur constante, puis on le porte à une distance double, et on observe que le thermomètre, dans cette seconde position, indique une température quatre fois moindre que dans la première. A une distance triple, il marque une température neuf fois moindre.

Cette seconde loi se démontre encore en s'appuyant sur ce théorème de géométrie, que la surface d'une sphère croît comme le carré de son rayon. En effet, si l'on conçoit une sphère creuse *ab* (fig. 211), d'un rayon quelconque, et à son centre une source de chaleur constante C, chaque unité de surface de la paroi intérieure reçoit une quantité déterminée de chaleur. Or, si l'on considère une sphère *ef*, de rayon double, sa surface, d'après le théorème cité, sera quatre fois plus grande. La paroi intérieure contiendra donc quatre fois plus d'unités de surface, et comme la quantité de chaleur émise du centre reste la même, chaque unité en recevra nécessairement quatre fois moins.

Pour démonter la troisième loi, on place au-devant d'un miroir concave une caisse de fer-blanc *mn* (fig. 212), cylindrique et d'une faible épaisseur, laquelle peut s'incliner plus ou moins autour d'un axe horizontal. La face antérieure de cette caisse est couverte de noir de fumée, et sur son bord supérieur est une tubulure qui sert à la remplir d'eau chaude. Enfin, entre la caisse et le miroir sont deux écrans H et K, percés d'ouvertures circulaires égales,

et livrant ainsi passage à un faisceau de rayons parallèles qui tombent sur le miroir.

Cela posé, ayant placé un thermomètre différentiel au foyer du miroir, on donne d'abord à la caisse remplie d'eau chaude la position verticale figurée en lignes ponctuées, et on la laisse ainsi jusqu'à ce que la température marquée par le thermomètre soit devenue stationnaire; puis donnant à la caisse la position inclinée *mn*, on attend que le thermomètre soit redevenu de nouveau stationnaire. Or, dans les deux cas on observe que le thermomètre

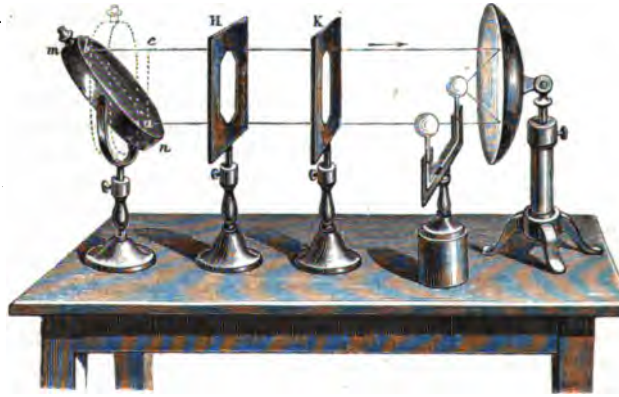


Fig. 212.

accuse exactement la même température, ce qui démontre la loi énoncée. En effet, dans le premier cas, la portion de la surface de la caisse qui envoie des rayons vers le miroir, est représentée par un cercle ayant pour diamètre *ac*, et égal, par conséquent, à l'ouverture des écrans; dans le second, la surface qui rayonne vers le miroir est une ellipse ayant pour grand axe *ab* et pour petit axe le diamètre des écrans, c'est-à-dire *ac;* cette seconde surface est donc plus grande que la première, et, par suite, elle émet plus de rayons vers le miroir. Or, puisque l'effet produit sur le thermomètre n'est pas plus intense que dans le premier cas, cela montre que, dans le second, où les rayons sont obliques à la surface rayonnante, l'intensité est moindre que dans le premier, où ils sont perpendiculaires à la même surface.

Pour traduire en formule la loi ci-dessus, soient i l'intensité des rayons perpendiculaires à la surface, et i' celle des rayons obliques. Ces intensités étant nécessairement en raison inverse des surfaces *ab* et *ac*, puisque l'effet est le même pour toutes deux, on a $i' \times$ surf. $ab = i \times$ surf. ac. Or, la surface *ac* n'étant autre chose que la projection de la surface *ab*, on sait, d'après un théorème connu en trigonométrie, que surf. $ac =$ surf. ab *sin. abc*. Portant cette valeur dans l'égalité ci-dessus et supprimant le facteur surf. *ab*, commun aux deux membres, on a $i' = i \times$ *sin. abc;* d'où l'on conclut que *l'intensité des rayons obliques est proportionnelle au sinus de l'angle que fait leur direction avec la surface rayonnante.*

343. **Équilibre mobile de température.** — Deux hypothèses ont été faites sur le rayonnement : dans la première, on suppose que lorsque deux corps, à des températures inégales, sont en présence, il y a seulement rayonnement du corps le plus chaud vers le plus froid, celui-ci n'émettant rien vers le premier; cela, jusqu'à ce que la température du corps le plus chaud, baissant graduellement, soit la même que celle de l'autre corps, et alors tout rayonnement cesse. Cette hypothèse a été remplacée par la suivante, due à Prévost de Genève, et la seule admise aujourd'hui. D'après ce savant, tous les corps, quelle que soit leur température, émettent constamment du calorique dans toutes les directions. Alors il y a perte, c'est-à-dire refroidissement, pour ceux dont la température est la plus élevée, parce que les rayons qu'ils émettent ont une plus grande intensité que ceux qu'ils reçoivent. Au contraire, il y a gain, c'est-à-dire échauffement, pour ceux dont la température est la moins élevée. Il vient ainsi un moment où la température est la même de part et d'autre; mais alors il y a encore échange de calorique entre les corps, seulement chacun reçoit autant qu'il émet; c'est pourquoi la température reste constante. C'est cet état particulier qu'on désigne sous le nom d'*équilibre mobile de température.*

344. **Loi de Newton sur le refroidissement.** — Un corps placé dans une enceinte vide ne se refroidit ou ne s'échauffe que par rayonnement. Dans l'atmosphère, il se refroidit ou s'échauffe par rayonnement et par son contact avec l'air. Dans les deux cas, la vitesse de refroidissement ou d'échauffement, c'est-à-dire *la quantité de chaleur perdue ou absorbée dans une seconde*, est d'autant plus grande que la différence de température est plus considérable.

Newton a posé sur le refroidissement et l'échauffement des corps la loi suivante : *La quantité de chaleur qu'un corps perd ou gagne, par seconde, est proportionnelle à la différence entre sa température et celle de l'enceinte.* Dulong et Petit ont fait voir

que cette loi n'est pas générale, comme l'avait supposé Newton, et qu'on ne doit l'appliquer qu'à des différences de température qui ne dépassent pas 15 à 20 degrés. Au delà, la quantité de chaleur perdue ou absorbée est plus grande que la loi ne l'indique.

On tire de la loi de Newton les conséquences suivantes :

1° Lorsqu'un corps est exposé à une source de chaleur constante, sa température ne saurait s'élever indéfiniment, car la quantité de chaleur qu'il reçoit en temps égaux est toujours la même, tandis que celle qu'il perd croît avec l'excès de sa température sur celle de l'air ambiant. Il vient donc un moment où la quantité de chaleur émise égale celle qui est absorbée, et la température est alors stationnaire.

2° La loi de Newton, appliquée au thermomètre différentiel, fait voir que les indications de cet instrument sont proportionnelles aux quantités de chaleur qu'il reçoit. Soit, en effet, un thermomètre différentiel dont l'une des boules reçoit les rayons émis par une source constante : l'instrument indique d'abord des températures croissantes, puis devient bientôt stationnaire; ce qu'on reconnaît à la position fixe que prend l'index. A ce moment, la quantité de chaleur que reçoit la boule égale celle qu'elle émet. Mais cette dernière, d'après la loi de Newton, est proportionnelle à l'excès de la température de la boule sur celle de l'enceinte, c'est-à-dire au nombre de degrés marqué par le thermomètre. Donc *la température indiquée par le thermomètre différentiel est aussi proportionnelle à la quantité de calorique qu'il reçoit.*

RÉFLEXION, ÉMISSION ET ABSORPTION DU CALORIQUE.

345. **Lois de la réflexion.** — Lorsque des rayons calorifiques tombent sur la surface d'un corps, ils se partagent généralement en deux parties : les uns pénètrent dans la masse du corps, les autres se relèvent comme repoussés par la surface, à la manière d'une bille élastique, ce qu'on exprime en disant qu'ils sont *réfléchis.*

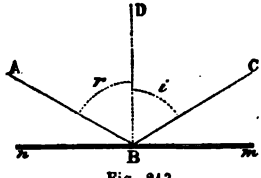


Fig. 213.

Si l'on représente par *mn* (fig. 213) une surface plane réfléchissante, par CB le *rayon incident*, par BD une ligne perpendiculaire à la surface, qu'on nomme *normale*, par BA le *rayon réfléchi*, l'angle CBD est dit l'*angle d'incidence*, et DBA *l'angle de*

réflexion. Cela posé, la réflexion du calorique, de même que celle de la lumière, est soumise aux deux lois suivantes :

1° *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence;*

2° *Le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante.*

Ces deux lois se démontrent au moyen de miroirs concaves (347).

346. **Réflexion sur les miroirs concaves.** — On nomme *miroirs concaves*, ou *réflecteurs*, des surfaces sphériques ou paraboliques, de métal ou de verre, qui servent à concentrer en un même point des rayons lumineux ou calorifiques.

Nous ne considérerons que les miroirs sphériques. La figure 215

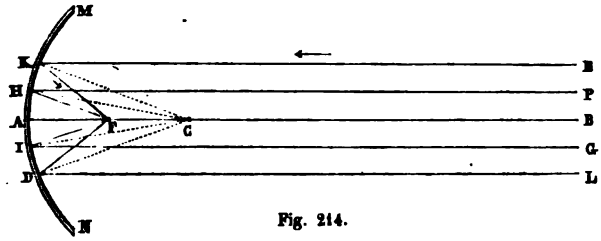


Fig. 214.

représente deux de ces miroirs; la figure 214 en donne une coupe médiane qu'on nomme *section principale*. Le centre C de la sphère à laquelle le miroir appartient, se nomme *centre de courbure;* le point A, milieu du réflecteur, est le *centre de figure;* enfin, la droite AB, menée par ces deux points, est l'*axe principal* du miroir.

Afin d'appliquer aux miroirs sphériques les lois de la réflexion sur les surfaces planes, on les regarde comme formés d'une infinité de surfaces planes infiniment petites, appartenant chacune au plan tangent correspondant; cette hypothèse permet de conclure, par la géométrie, que les normales à ces petites surfaces viennent toutes concourir au centre de courbure.

Cela posé, sur l'axe AB du miroir MN, supposons une source de chaleur assez éloignée pour que les rayons EK, PH..., qui en émanent, puissent être considérés comme parallèles entre eux. D'après l'hypothèse ci-dessus que le miroir est formé d'une infinité de petits éléments plans, le rayon EK se réfléchit sur l'élément K absolument comme sur un miroir plan; c'est-à-dire que CK étant la normale à cet élément, le rayon prend une direction KF telle que l'angle CKF est égal à l'angle CKE. Les autres rayons PH, GI..., se

réfléchissant de la même manière, tous ces rayons, après leur réflexion, viennent sensiblement concourir en un même point F situé sur le milieu de AC, ainsi qu'il sera démontré en optique. Il y a donc, en F, réunion des rayons calorifiques, et, par conséquent, une plus grande élévation de température qu'en tout autre point. De là, le nom de *foyer* qu'a reçu ce point. La distance FA du foyer au miroir s'appelle la *distance focale*.

Dans la figure ci-dessus, le calorique se propage suivant les lignes EKF, LDF..., dans le sens des flèches; mais, reciproquement, si le corps chaud est placé en F, le calorique se propage suivant les lignes FKE, FDL..., de manière que les rayons émis du foyer deviennent, après la réflexion, parallèles entre eux; d'où il résulte que la chaleur transmise ne perd pas de son intensité.

347. **Démonstration des lois de la réflexion.** — L'expérience sui-

Fig. 215 (h = 1m,50).

vante, faite pour la première fois, à Genève, par Pictet et Saussure, est connue sous le nom d'*expérience des miroirs conjugués*, démontre non-seulement l'existence des foyers, mais en même temps les lois de la réflexion du calorique. Deux réflecteurs M et N (fig. 215) sont disposés à 4 ou 5 mètres de distance, de manière que leurs axes coïncident. Au foyer de l'un d'eux, dans un petit panier en

fil de fer A, on place des charbons incandescents; au foyer de l'autre est un corps inflammable B, de l'amadou, par exemple. Les rayons émis par la source A se réfléchissent une première fois sur le miroir M au foyer duquel est cette source. Ayant pris, par l'effet de cette réflexion, une direction parallèle à l'axe (346), les rayons viennent se réfléchir une seconde fois sur l'autre réflecteur et concourir en son foyer B. Ce qui le prouve, c'est que le morceau d'amadou placé en ce point prend feu, tandis qu'en deçà ou au delà du foyer il ne s'enflamme pas.

Cette expérience sert en outre à démontrer que le calorique et la lumière se réfléchissent suivant les mêmes lois. Pour cela, on place au foyer A une bougie allumée, et au foyer B un écran de verre dépoli, et on observe, sur celui-ci, un foyer lumineux exactement où s'enflamme l'amadou; ce qui fait voir que le foyer lumineux et le foyer calorique se forment au même point. La réflexion a donc lieu, dans les deux cas, suivant les mêmes lois. Or, il sera démontré plus tard que, pour la lumière, l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence, et que le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante (405) : *donc il en est de même pour le calorique.*

C'est en raison de la haute température qu'on peut obtenir aux foyers des miroirs concaves, qu'on leur a donné le nom de *miroirs ardents.* On rapporte qu'Archimède embrasa les vaisseaux romains, devant Syracuse, au moyen de semblables miroirs. Buffon a construit des miroirs ardents dont la puissance prouve que le fait attribué à Archimède est possible. Ces miroirs étaient formés d'un grand nombre de glaces planes et étamées, longues de 22 centimètres sur 16 de large. Elles pouvaient être tournées indépendamment l'une de l'autre dans telle ou telle direction, de manière que les rayons réfléchis sur chacune vinssent concourir en un même point. Avec 128 glaces, par un soleil ardent d'été, Buffon enflamma ainsi une planche de bois goudronnée, à 68 mètres de distance.

348. **Réflexion dans le vide.** — Le calorique se réfléchit dans le vide comme dans l'air. Pour le démontrer, on fait l'expérience suivante, due à Davy, en Angleterre. Sous le récipient de la machine pneumatique, on dispose deux petits réflecteurs en regard l'un de l'autre. Au foyer de l'un est un thermomètre très-sensible, et au foyer de l'autre une source de chaleur électrique consistant en un fil de platine qu'on rend incandescent en y faisant passer le courant d'une pile. On voit le thermomètre monter aussitôt de plusieurs degrés, phénomène qui est bien dû au calorique réfléchi, car le

thermomètre n'accuse plus la même élévation de température s'il n'est pas exactement au foyer du second réflecteur.

349. **Réflexion apparente du froid.** — Si l'on dispose deux réflecteurs en regard l'un de l'autre, comme les représente la figure 215, et qu'au lieu de charbons incandescents on place au foyer de l'un d'eux une certaine masse de glace, l'air ambiant étant à 12 ou 15 degrés, par exemple, on observe qu'un thermomètre différentiel, placé au foyer de l'autre réflecteur, indique un refroidissement de plusieurs degrés. Ce phénomène semble d'abord résulter de rayons frigorifiques émis par la glace. Mais cette *réflexion apparente du froid*, comme on l'appelle, s'explique d'après ce qui a été dit (343) de l'équilibre de température qui tend toujours à s'établir entre les corps. Il y a encore échange de calorique, de même que dans l'expérience où l'on enflamme l'amadou; seulement les rôles sont changés : c'est ici le thermomètre qui est le corps chaud. Comme les rayons qu'il émet sont plus intenses que ceux émis par la glace, il n'y a pas compensation entre la chaleur qu'il cède et celle qu'il reçoit; de là son refroidissement.

C'est au même fait qu'il faut rapporter le froid qu'on ressent près des murailles de plâtre, de pierre, et en général, près de toute masse dont la température est inférieure à la nôtre.

350. **Pouvoir réflecteur.** — On appelle *pouvoir réflecteur* la propriété qu'ont les corps de réfléchir une portion plus ou moins grande de la chaleur incidente.

Le pouvoir réflecteur est variable d'une substance à une autre. Afin d'étudier ce pouvoir sur diverses substances, sans avoir besoin d'en construire autant de réflecteurs, Leslie disposa ses expériences comme le montre la figure 216. La source de chaleur est un cube M rempli d'eau à 100 degrés. Sur l'axe d'un réflecteur sphérique N, entre le foyer et le miroir, est fixée une plaque a de la substance dont on cherche le pouvoir réflecteur. Avec cette disposition, les rayons émis par la source et réfléchis une première fois sur le miroir, rencontrent la plaque a, s'y réfléchissent de nouveau, et viennent former leur foyer entre la plaque et le miroir, en un point où l'on place la boule d'un thermoscope. Or, le réflecteur et le thermoscope restant les mêmes, et l'eau du cube étant toujours à 100 degrés, on observe que la température accusée par le thermoscope varie avec la nature des plaques a qui sont en expérience; d'où l'on déduit, non pas le pouvoir réflecteur absolu d'un corps, mais le rapport de ce pouvoir à celui d'un autre corps pris pour terme de comparaison. En effet, conformément à ce qui a été dit (344,2°) sur

l'application de la loi de Newton au thermomètre différentiel, les températures marquées par cet instrument sont proportionnelles aux quantités de chaleur qu'il reçoit. Par conséquent, si une plaque de verre et une plaque de plomb, par exemple, font marcher le thermomètre différentiel, la première de 1 et l'autre de 6 degrés, on doit en conclure que la quantité de chaleur réfléchie par le plomb

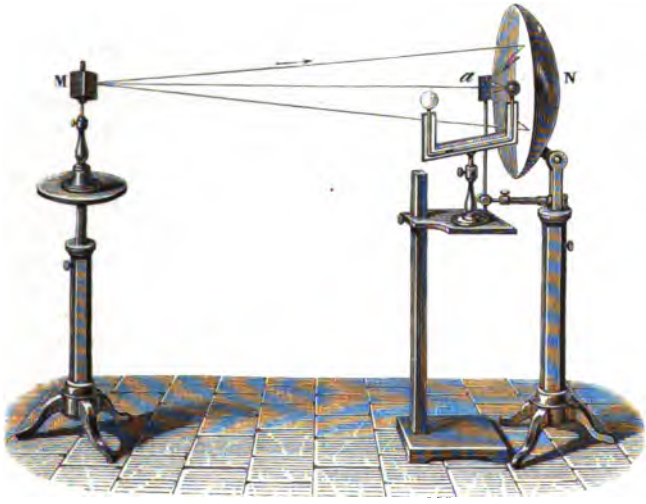


Fig. 216 ($h = 1^m,50$).

est 6 fois plus grande que la quantité de chaleur réfléchie par le verre; car celle émise par la source étant la même, le réflecteur concave en réfléchit la même portion, et la différence ne peut dépendre que du pouvoir réflecteur des plaques a.

C'est par ce procédé, et en représentant par 100 le pouvoir réflecteur du cuivre jaune, pris pour terme de comparaison, que Leslie a formé le tableau suivant des pouvoirs réflecteurs relatifs :

Cuivre jaune	100	Encre de Chine	13
Argent	90	Verre	10
Étain	80	Verre huilé	5
Acier	70	Verre mouillé d'eau	0
Plomb	60	Noir de fumée	0

Melloni a aussi fait des recherches sur le pouvoir réflecteur des corps, et il résulte des expériences de ce savant, ainsi que de celles de Leslie, que le pouvoir réflecteur des métaux est beaucoup plus grand que celui des autres corps, comme le montre le tableau ci-dessus. Melloni a de plus constaté, au moyen d'un appareil qui sera décrit plus tard, le thermo-multiplicateur, que de tous les métaux c'est le mercure qui a le plus grand pouvoir réflecteur.

On verra bientôt (354) quelles sont les causes qui, pour un même corps, modifient le pouvoir réflecteur.

351. **Pouvoir absorbant.** — Le *pouvoir absorbant* des corps est leur propriété de laisser pénétrer dans leur masse une portion plus ou moins grande de la chaleur incidente.

Le pouvoir absorbant d'un corps est toujours dans un ordre inverse de son pouvoir réflecteur; c'est-à-dire que plus un corps réfléchit le calorique, moins il l'absorbe, et réciproquement. Mais les deux pouvoirs ne sont pas complémentaires; c'est-à-dire que la somme des quantités de chaleur réfléchie et absorbée ne représente pas la totalité de la chaleur incidente. Elle est toujours moindre; ce qui tient à ce que la chaleur incidente se divise réellement en trois parties : 1° une qui est absorbée; 2° une autre qui est réfléchie régulièrement, c'est-à-dire suivant les lois démontrées précédemment (347); 3° une troisième partie qui est réfléchie irrégulièrement, c'est-à-dire dans toutes les directions, et qui se désigne sous le nom de *chaleur diffuse* (366).

Pour déterminer le pouvoir absorbant des corps, Leslie a fait usage de l'appareil déjà employé à la recherche des pouvoirs réflecteurs (fig. 216). Mais il supprimait la plaque *a* et plaçait la boule du thermoscope au foyer même du réflecteur. Cette boule étant successivement recouverte de noir de fumée, de vernis, de feuilles d'or, d'argent, de cuivre, etc., le thermoscope, sous l'influence de la source de chaleur M, indiquait une température d'autant plus élevée, que la substance qui enveloppait la boule focale absorbait plus de calorique. Leslie a constaté ainsi que le pouvoir absorbant d'un corps est d'autant plus grand que son pouvoir réflecteur est plus faible. Toutefois, dans ces expériences, le rapport des pouvoirs absorbants ne peut se déduire de celui des températures marquées par le thermoscope, car ici la loi de Newton n'est pas rigoureusement applicable, cette loi n'étant vraie que pour des corps dont la substance ne change pas; tandis que l'enveloppe qui recouvre la boule focale varie à chaque observation. Mais on va voir ci-dessous

(353) comment les rapports des pouvoirs absorbants peuvent se déduire des rapports des pouvoirs émissifs.

352. **Pouvoir émissif.** — Le *pouvoir émissif* des corps est leur propriété d'émettre, à température et à surface égales, une quantité de chaleur plus ou moins grande.

C'est encore au moyen de l'appareil représenté dans la figure 216 que Leslie a déterminé le pouvoir émissif des corps. Pour cela, la boule du thermoscope était placée au foyer même du réflecteur, et les faces du cube M étaient formées de métaux différents, ou recouvertes de diverses substances, comme noir de fumée, papier, eau, etc. Le cube étant plein d'eau à 100 degrés, et toutes les autres conditions restant les mêmes, Leslie tournait successivement vers le réflecteur chaque face du cube, et notait les températures fournies par le thermoscope. Or, pour la face recouverte de noir de fumée, la température, au foyer du réflecteur, s'élevait plus que pour toutes les autres, et c'étaient les faces métalliques qui produisaient les plus faibles températures. En appliquant ici la loi de Newton, et en représentant par 100 la chaleur émise par le noir de fumée, Leslie a formé le tableau suivant des pouvoirs émissifs :

Noir de fumée	100	Colle de poisson	80
Eau	100	Plomb terne	45
Papier	98	Mercure	20
Cire à cacheter	95	Plomb décapé	19
Verre blanc ordinaire	90	Fer poli	15
Encre de Chine	88	Étain, or, argent, cuivre etc	12

Il est à remarquer que dans ce tableau l'ordre des corps est précisément l'inverse de celui du tableau des pouvoirs réflecteurs. MM. de La Prévostaye et Desains, qui ont fait des recherches récentes sur les pouvoirs émissifs, ont obtenu des nombres notablement différents de ceux qui précèdent.

353. **Identité des pouvoirs absorbants et des pouvoirs émissifs.** — On ne saurait déduire les pouvoirs absorbants des pouvoirs réflecteurs, puisqu'on a vu (351) qu'ils ne sont pas rigoureusement complémentaires l'un de l'autre. Mais les pouvoirs absorbants seraient déterminés si l'on démontrait qu'ils sont égaux, pour chaque corps, aux pouvoirs émissifs. Or, c'est ce que Dulong et Petit ont conclu de l'expérience suivante. Dans un grand ballon de verre, qui était maintenu à zéro dans de la glace, et dont les parois étaient noircies intérieurement, ils fixèrent un thermomètre chauffé d'abord à une certaine température, 15 degrés, par exemple ; puis, ayant

fait le vide dans le ballon, au moyen d'une tubulure qui le faisait communiquer à une machine pneumatique, ils laissèrent le thermomètre se refroidir graduellement et notèrent le temps qu'il mettait à descendre de 10 à 5 degrés. Recommençant ensuite l'expérience en sens contraire, c'est-à-dire maintenant les parois du ballon à 15 degrés et refroidissant le thermomètre à zéro, ils observèrent le temps que le thermometre employait à monter de 5 à 10 degrés, et ils reconnurent que ce temps était précisément le même qu'il avait mis à descendre de 10 à 5 degrés ; on conclut de là que, pour un même corps et pour une même différence entre sa température et celle de l'enceinte, le pouvoir émissif est égal au pouvoir absorbant, puisque les quantités de chaleur émises et absorbées dans le même temps sont égales.

354. **Causes qui modifient les pouvoirs réflecteurs, absorbant et émissif.** — Les pouvoirs émissif et absorbant étant égaux, toute cause qui modifie l'un modifie nécessairement l'autre dans le même sens. Quant au pouvoir réflecteur, puisqu'il marche dans un ordre inverse des deux autres, toute cause qui augmente ceux-ci le diminue, et réciproquement.

On a déjà vu que ces différents pouvoirs varient d'une substance à une autre; que ce sont les métaux qui ont le plus grand pouvoir réflecteur, et le noir de fumée le plus faible. Mais, pour un même corps, ces pouvoirs sont encore modifiés par le degré de poli, par la densité, par l'épaisseur de la substance rayonnante, par l'obliquité des rayons incidents ou émis, et enfin par la nature de la source.

On a longtemps admis que le pouvoir réflecteur croissait d'une manière générale avec le degré de poli des surfaces, et que les autres pouvoirs, au contraire, diminuaient. Mais Melloni a constaté qu'en rayant une plaque métallique polie, tantôt on diminuait son pouvoir réflecteur, tantôt on l'augmentait, phénomène que ce physicien a expliqué par le plus ou moins de densité que prend la plaque métallique réfléchissante. Si cette plaque a d'abord été écrouie (71), l'homogénéité a été détruite par l'effet de l'écrouissage; les molécules sont plus rapprochées à la surface que dans la masse, et le pouvoir réflecteur est augmenté. Mais lorsqu'on raye la surface, la masse intérieure, qui est moins dense, est mise à nu, et le pouvoir réflecteur diminue. Au contraire, dans une plaque non écrouie et homogène dans toute sa masse, le pouvoir réflecteur est augmenté lorsqu'on raye la plaque avec un instrument tranchant, ce qui provient d'une augmentation de densité à la surface, occasionnée par les raies qu'on y a tracées.

L'épaisseur des substances rayonnantes peut aussi modifier leur pouvoir émissif, ainsi que le prouvent les expériences de Leslie, de Rumford et de Melloni. Ce dernier physicien s'est assuré qu'en vernissant les faces d'un cube métallique rempli d'eau à une température constante, le pouvoir émissif croissait avec le nombre des couches de vernis, jusqu'à 16 couches, et qu'au delà il restait constant, quel qu'en fût le nombre. Il a calculé que l'épaisseur des 16 couches étaient de $\frac{4}{100}$ de millimètre. Quant aux métaux, des feuilles d'or de 8, 4 et 2 millièmes de millimètre, ayant été successivement appliquées sur les faces d'un cube de verre, la diminution du calorique rayonnant fut la même. Il paraît résulter de là que pour les métaux l'épaisseur de la couche rayonnante est sans influence, du moins dans la limite d'épaisseur qu'on peut leur donner.

Melloni a constaté aussi que le pouvoir absorbant varie avec la nature de la source de chaleur. Par exemple, pour une même quantité de chaleur incidente, le carbonate de plomb en absorbe à peu près deux fois plus, si elle est émise par un cube plein d'eau à 100 degrés, que si elle l'est par une lampe. Le noir de fumée seul absorbe toujours la même quantité de chaleur, quelle qu'en soit la source.

Le pouvoir absorbant varie avec l'inclinaison des rayons incidents. Il est à son maximum à l'incidence normale, et diminue à mesure que les rayons incidents s'écartent de la normale. C'est une des raisons pour lesquelles le sol s'échauffe plus l'été que l'hiver, car, l'été, les rayons solaires sont moins obliques.

Les corps réduits en poudre paraissent, en général, avoir tous le même pouvoir émissif; c'est du moins ce qu'ont observé MM. Masson et Courtépée pour seize corps, sur vingt, qu'ils ont soumis à l'expérience.

Quant aux corps gazeux en combustion, le pouvoir rayonnant est extrêmement faible, comme on le constate en approchant la boule d'un thermoscope d'une flamme d'hydrogène, quoique la température de cette flamme soit très-élevée. Mais si l'on place dans la flamme une spirale de platine, cette spirale, prenant la température de la flamme, rayonne fortement, comme l'indique le thermomètre. C'est par un effet semblable que les flammes des lampes et du gaz d'éclairage rayonnent beaucoup plus que la flamme d'hydrogène, à cause de l'excès de carbone qu'elles contiennent, et qui, n'étant pas brûlé en totalité, devient incandescent dans la flamme.

355. **Applications.** — La propriété que possèdent les corps d'ab-

sorber, de réfléchir ou d'émettre plus ou moins facilement la chaleur, présente de nombreuses applications dans l'économie domestique et dans les arts. S'il s'agit, par exemple, de faire choix des vêtements les plus convenables pour l'hiver ou pour l'été, c'est aux vêtements blancs qu'on doit donner la préférence. En effet, leur pouvoir émissif est moindre que celui des vêtements noirs; par conséquent, ils s'opposent davantage, pendant l'hiver, à la déperdition de la chaleur du corps humain. En été, à cause de leur faible pouvoir absorbant, ils absorbent moins la chaleur de l'atmosphère que les vêtements noirs; c'est pourquoi ils paraissent plus frais. C'est sans doute la raison pour laquelle la nature a donné, aux animaux qui habitent les régions polaires, un pelage blanc, surtout pendant l'hiver.

Pour les vases dans lesquels on fait chauffer les liquides, tels que les cafetières, il y a avantage à ce que leur surface soit noire et dépolie, puisque alors le pouvoir absorbant est plus grand. L'éclat qu'on est dans l'habitude de leur donner est acheté aux dépens du combustible. S'il s'agit, au contraire, de conserver un liquide chaud le plus longtemps possible, il faut le placer dans un vase de métal poli et brillant, car le pouvoir émissif étant alors moindre, le refroidissement est plus lent.

Dans les Alpes, les montagnards accélèrent la fusion des neiges en les recouvrant de terre, ce qui augmente le pouvoir absorbant.

Dans nos maisons, les revêtements extérieurs des poêles, des calorifères, doivent être noirs, pour donner une libre émission au calorique; au contraire, l'intérieur de nos cheminées devrait être revêtu de plaques de porcelaine ou de faïence blanches et polies, afin d'augmenter le pouvoir réflecteur du foyer vers l'appartement.

* TRANSMISSION DU CALORIQUE RAYONNANT AU TRAVERS DES CORPS.

356. **Pouvoir diathermane.** — Il est des corps qui donnent passage au calorique rayonnant, de la même manière que les corps diaphanes laissent passer la lumière; d'autres sont privés de cette propriété, ou ne la possèdent qu'à un degré très-faible. Melloni a donné aux premiers le nom de corps *diathermanes*, et aux derniers celui de corps *athermanes*. Les gaz sont les corps les plus diathermanes, les métaux sont complétement athermanes. Malgré l'analogie qui existe entre le calorique rayonnant et la lumière, notons, dès à présent, que les corps transparents ne sont pas toujours les plus diathermanes, et que les corps opaques sont loin d'être toujours athermanes.

Prévost, à Genève, et Delaroche, en France, dans les années 1811 et 1812, découvrirent plusieurs des phénomènes que présentent les corps diathermanes; mais c'est

seulement en 1832 que Melloni, à l'aide d'un ingénieux appareil thermométrique que nous décrirons plus tard, donna une théorie complète des propriétés diathermanes des solides et des liquides.

Ce physicien, dans ses expériences, a fait usage de cinq sources de chaleur, savoir : 1° une lampe Locatelli, c'est-à-dire sans verre, avec réflecteur, et à un seul courant d'air; 2° une lampe d'Argand, c'est-à-dire à double courant d'air et munie d'un verre; telles sont les lampes Carcel; 3° un fil de platine contourné en hélice, et maintenu au rouge blanc dans la flamme d'une lampe à alcool; 4° un petit cube de cuivre rouge noir à l'extérieur et rempli d'eau maintenue à 100 degrés; 5° enfin, une plaque de cuivre rouge noircie et chauffée à 400 degrés environ par la flamme d'une lampe à alcool.

C'est en changeant successivement les plaques diathermanes et les sources de chaleur que Melloni a constaté les faits que nous allons faire connaître.

357. **Causes qui modifient le pouvoir diathermane.** — Les causes qui modifient le pouvoir diathermane sont au nombre de six :

1° La nature de la substance dont sont formés les écrans que traverse le calorique;
2° Le degré de poli de ces écrans;
3° Leur épaisseur;
4° Le nombre des écrans que traverse le calorique,
5° La nature des écrans déjà traversés;
6° La nature de la source de chaleur.

358. **Influence de la substance des écrans.** — En expérimentant sur différents liquides placés successivement dans une auge de verre dont les faces opposées étaient parallèles et distantes l'une de l'autre de 9mm,2, et en comparant les indications données par son appareil, lorsqu'il y avait des liquides interposés, à l'effet observé lorsque le calorique arrivait directement, Melloni, en prenant pour source de chaleur une lampe d'Argand, a trouvé que, sur 100 rayons incidents,

Le sulfure de carbonne en laisse passer	63
L'huile d'olive	30
L'éther	21
L'acide sulfurique	17
L'alcool	15
L'eau sucrée ou alunée	12
L'eau distillée	11

En expérimentant de même sur diverses substances solides taillées en lames, sous une épaisseur constante de 2m,6, Melloni a obtenu le tableau suivant :

Sur 100 rayons,	le sel gemme en laisse passer	92
	le spath d'Islande et le verre à glace.	62
	le cristal de roche enfumé	57
	le carbonate de plomb diaphane	52
	la chaux sulfatée diaphane	20
	l'alun diaphane	12
	le sulfate de cuivre	0

Des résultats consignés dans ces deux tableaux, on conclut que des substances plus ou moins impénétrables à la lumière, comme le cristal de roche enfumé, peuvent très-bien se laisser traverser par le calorique; tandis que des substances très-peu perméables au calorique, par exemple, le sulfate de chaux et surtout l'alun, peuvent

être très-diaphanes. Ces diverses expériences conduisent donc à admettre qu'il n'y a point de rapport entre le pouvoir diathermane et la translucidité des corps.

359. Influence du poli. — Le pouvoir diathermane d'un écran augmente avec son degré de poli. Par exemple, Melloni a trouvé que les indications de son appareil variaient de 12 à 5 degrés, en interposant des écrans de verre de même nature et de même épaisseur, mais plus ou moins polis.

360. Influence de l'épaisseur. — La quantité de chaleur qui traverse un écran diathermane décroît quand l'épaisseur augmente; mais l'absorption n'est pas proportionnelle à l'épaisseur. C'est, en général, dans les premières couches que l'absorption se fait. Au delà d'une certaine épaisseur, la quantité de chaleur transmise tend à rester constante, lors même que l'épaisseur continue à croître.

Melloni a constaté ce fait en expérimentant sur des plaques de verre blanc dont les épaisseurs étaient 1, 2, 3, 4, et il a trouvé que sur 1000 rayons, ces plaques en laissaient passer respectivement 619, 576, 558, 549, nombres dont les différences tendent à devenir nulles.

361. Influence du nombre des écrans. — L'augmentation du nombre des écrans traversés par le calorique produit un effet analogue à l'accroissement de l'épaisseur; c'est-à-dire que l'absorption croît moins vite que le nombre des écrans ou, en d'autres termes, que la quantité de chaleur absorbée décroît d'un écran au suivant.

De plus, si plusieurs lames de même espèce sont superposées, elles arrêtent plus de chaleur qu'une seule plaque d'une épaisseur égale à la somme des épaisseurs. Enfin, l'effet produit par des plaques superposées, de différentes substances, est indépendant de l'ordre dans lequel elles se succèdent.

362. Influence de la nature des écrans déjà traversés. — Les rayons calorifiques qui ont déjà traversé une ou plusieurs substances diathermanes, subissent une modification qui les rend plus ou moins propres à être transmis au travers de nouvelles substances diathermanes. Par exemple, en comparant les résultats obtenus avec une lampe d'Argand dont la flamme est entourée d'un verre, à ceux fournis par une lampe Locatelli qui n'a pas de verre, Melloni, en représentant par 100 les rayons incidents, a trouvé les résultats suivants, relativement à la quantité de chaleur transmise par les deux lampes, savoir :

SUBSTANCES.	LAMPE d'Argand.	LAMPE de Locatelli.
Le sel gemme laisse passer	92	92
Le spath d'Islande et le verre à glace	62	39
Le cristal de roche enfumé	57	37
La chaux sulfatée	20	14
L'alun	12	9

On conclut de là que la chaleur qui, dans la lampe d'Argand, a déjà traversé le verre, se transmet plus facilement au travers des autres substances. Le sel gemme seul laisse toujours passer la même quantité de chaleur incidente.

363. Influence de la nature de la source. — La nature de la source

de chaleur modifie beaucoup, en général, le pouvoir diathermane des corps, ainsi que le démontrent les résultats obtenus par Melloni, en faisant usage de quatre sources différentes. En effet, en représentant encore par 100 les rayons incidents, ce savant a obtenu les résultats consignés dans le tableau suivant :

SUBSTANCES.	LAMPE Locatelli.	PLATINE incandescent.	CUIVRE chauffé à 400°.	CUIVRE chauffé à 100°.
Le sel gemme laisse passer.....	92	92	92	92
Le spath d'Islande.....	39	28	6	0
Le verre à glace.....	39	24	6	0
La chaux sulfatée.....	14	5	0	0
L'alun.....	9	2	0	0

Ce tableau montre, le sel gemme faisant seul exception, que la proportion de chaleur transmise au travers des solides diminue avec la température de la source, et devient nulle pour une source à 100 degrés. Les liquides offrent le même phénomène.

364. Différentes espèces de rayons calorifiques. — Les propriétés que présente la chaleur, dans son passage au travers des corps, ont porté Melloni à faire, sur le calorique, une hypothèse analogue à celle qui a été faite depuis longtemps sur la lumière. Ainsi que Newton a admis plusieurs espèces de lumière, le *rouge*, l'*orangé*, le *jaune*, le *vert*, le *bleu*, l'*indigo* et le *violet*, qui sont inégalement transmissibles au travers des corps diaphanes, et qui peuvent être combinées entre elles ou isolées; de même Melloni admet l'existence de plusieurs espèces de rayons calorifiques qui seraient émis simultanément, en proportions variables, par les diverses sources de chaleur, et qui seraient doués de la propriété de traverser plus ou moins facilement les substances diathermanes. Celles-ci posséderaient donc une véritable *coloration* calorifique : c'est-à-dire qu'elles absorberaient certains rayons et laisseraient passer les autres, de la même manière qu'un verre bleu, par exemple, est traversé par la couleur bleue et ne l'est pas par les autres couleurs.

La théorie de Melloni s'explique très-bien dans le système des ondulations, en admettant que les propriétés des différentes espèces de rayons calorifiques sont dues à des nombres de vibrations différents, ou à des ondes calorifiques d'inégale longueur.

365. Application du pouvoir diathermane. — Quoique aucune expérience directe n'ait été faite sur le pouvoir diathermane des gaz, on ne peut douter que l'air ne soit très-diathermane, puisque c'est dans ce fluide que se produisent tous les phénomènes de chaleur rayonnante. C'est à cause de leur grand pouvoir diathermane que les couches supérieures de l'atmosphère sont toujours à une basse température, malgré les rayons solaires qui les traversent. L'eau étant peu diathermane, il se produit le phénomène contraire au sein des mers et des lacs. Les couches supérieures participent seules aux variations de température, suivant les saisons; tandis qu'à une certaine profondeur la température reste constante.

Les propriétés des corps diathermanes ont été utilisées pour séparer la lumière et la chaleur qui rayonnent ensemble d'une même source. Le sel gemme recouvert de noir de fumée arrête complétement la lumière et laisse passer le calorique. Au contraire, des lames ou des dissolutions d'alun arrêtent le calorique et donnent passage

à la lumière. Ce dernier procédé est appliqué avantageusement aux appareils qu'on éclaire avec des rayons solaires ou avec la lumière électrique, lorsqu'il est nécessaire d'éviter une chaleur trop intense.

Dans les jardins, l'usage des cloches dont on abrite certaines plantes est fondée sur la propriété diathermane du verre, indiquée dans le tableau ci-dessus (page 335); cette substance est traversée par les rayons solaires qui ont une haute température, et ne l'est pas par la chaleur qui rayonne du sol.

366. **Diffusion.** — Nous avons déjà dit (351) que la chaleur qui tombe sur la surface d'un corps ne se réfléchit pas totalement suivant les lois de la réflexion démontrées précédemment (347). Une partie se réfléchit irrégulièrement, c'est-à-dire dans toutes les directions autour du point d'incidence. C'est ce phénomène qu'on désigne sous le nom de *diffusion* ou de *réflexion irrégulière* du calorique, et on donne le nom de *réflexion régulière*, de *réflexion spéculaire*, à celle qui suit les lois citées ci-dessus. Le phénomène de la diffusion par les surfaces des corps a été découvert par Melloni.

La réflexion régulière ne se fait que sur des surfaces polies; la réflexion irrégulière, au contraire, se produit sur les surfaces ternes ou rugueuses, comme des plaques de bois, de verre, de métal, dépolies et mates.

Le pouvoir diffusif varie selon la nature de la source et celle des substances réfléchissantes. Les corps blancs sont très-dispersifs pour le calorique qui rayonne d'une source incandescente. Les métaux mats sont encore plus dispersifs que les corps blancs.

CHAPITRE X

MACHINES A VAPEUR.

367. **Objet des machines à vapeur.** — *Les machines à vapeur* sont des appareils qui servent à utiliser la force élastique de la vapeur d'eau comme force motrice.

Dans les machines généralement usitées, la vapeur, en vertu de sa force élastique, imprime à un piston un mouvement rectiligne alternatif qui est ensuite transformé en mouvement circulaire continu, à l'aide de divers organes mécaniques.

Toute machine à vapeur se composant de deux parties bien distinctes : l'appareil où se produit la vapeur et la machine proprement dite, nous décrirons d'abord le premier appareil.

368. **Générateur de vapeur.** — On appelle *générateur* ou *chaudière* l'appareil qui sert à la production de la vapeur. La figure 217 représente la forme qu'on donne ordinairement aux générateurs des machines fixes; ceux des locomotives et des bateaux à vapeur en diffèrent beaucoup. C'est un long cylindre de tôle, dont les extrémités sont hémisphériques; au-dessous sont deux autres cylindres d'un plus petit diamètre, également en tôle, et communiquant au générateur par deux tubulures. Ces cylindres, dont un seul est visible dans le dessin, se nomment *bouilleurs;* ils sont destinés à recevoir le *coup de feu* du foyer. Ces bouilleurs sont complétement remplis d'eau, et la chaudière l'est à un peu plus de moitié.

Au-dessous des bouilleurs est le foyer dans lequel on brûle de la houille ou du bois. Les produits de la combustion, après avoir circulé autour des bouilleurs et de la chaudière, s'échappent dans l'atmosphère par une cheminée à laquelle on donne, en général, une très-grande hauteur afin d'activer le tirage.

La légende suivante nous dispense d'entrer dans de plus grands détails.

Légende explicative de la figure 217.

A Tube qui conduit la vapeur au tube *c* de la boîte à distribution de la machine (fig. 219, page 341).

B Tube conduisant la vapeur à un manomètre qui indique la tension de la vapeur dans l'intérieur de la chaudière.

C Tube qui sert à l'introduction de l'eau dans la chaudière.

D *Sifflet d'alarme*, ainsi nommé parce qu'il sert à donner l'alarme lorsqu'il n'y a plus assez d'eau dans la chaudière, circonstance qui peut amener une explosion lors de la rentrée de l'eau, parce qu'alors les parois étant rouges, il se produit un excès de vapeur au moment ou l'eau rentre. Tant que le niveau n'est pas trop bas dans la chaudière, la vapeur ne passe pas dans le sifflet; mais si le niveau baisse au-dessous de la hauteur con-

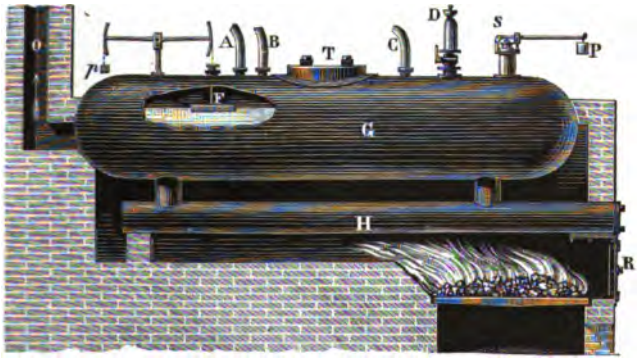


Fig. 217 (l = 5m).

venable, un petit flotteur qu'on ne voit pas dans la figure, et qui ferme le pied du sifflet, descend et donne issue à la vapeur. Celle-ci, en s'échappant, vient raser les bords d'un disque métallique, et lui fait rendre le son aigu qu'on entend fréquemment sur les chemins de fer.

F *Flotteur* destiné à indiquer le niveau de l'eau dans la chaudière. Il se compose d'une pierre rectangulaire plongeant en partie dans l'eau, comme le montre la déchirure pratiquée dans la paroi du générateur. Cette pierre, qui est suspendue à l'extrémité d'un levier, est maintenue en équilibre par la perte de poids qu'elle éprouve dans l'eau et par un contre-poids *p*. Tant que l'eau s'élève à la hauteur voulue, le levier qui soutient le flotteur reste horizontal; mais il incline vers F lorsqu'il n'y a pas assez d'eau, et en sens contraire, s'il y en a trop. Dans l'un comme dans l'autre cas, le chauffeur est prévenu pour régler convenablement l'introduction de l'eau d'alimentation.

G *Générateur* cylindrique en tôle, complétement fermé.

H *Bouilleurs*, au nombre de deux, juxtaposés.

O Conduits de la cheminée.
P Poids qui charge la soupape de sûreté.
p Contre-poids du flotteur.
R Porte du foyer.
S *Soupape de sûreté*, déjà décrite en parlant de la marmite de Papin (295).
T *Trou d'homme*, ouverture qui s'ouvre pour le nettoyage et la réparation de la chaudière.

369. **Machine à double effet, ou machine de Watt.** — On appelle *machine à vapeur à double effet* celle dans laquelle la vapeur agit alternativement au-dessus et au-dessous du piston. Elle est aussi connue sous le nom de *machine de Watt*, parce qu'elle est construite dans le système qu'avait adopté cet illustre ingénieur.

Donnons d'abord une idée de l'ensemble de cette machine, puis nous décrirons chaque pièce séparément. Sur la gauche du dessin (fig. 218) est un cylindre de fonte dans lequel se rend la vapeur de la chaudière. Une déchirure dans la paroi de ce cylindre laisse voir un piston sur lequel la vapeur agit alternativement en dessous et en dessus pour le faire monter et descendre. Par sa tige A, ce piston transmet son mouvement alternatif à un énorme levier de fonte L, qu'on nomme *balancier*, et que supportent quatre colonnes de fonte. Le balancier transmet lui-même son mouvement à une longue pièce de fonte I qu'on appelle *bielle*, et qui s'articule sur une *manivelle* K, à laquelle elle imprime un mouvement de rotation continu. Cette manivelle est fixée à un arbre horizontal de fonte qu'on nomme *arbre de couche*, et qui tourne avec elle. C'est cet arbre qui, au moyen de roues d'engrenage ou de courroies sans fin, va porter le mouvement et la force à diverses machines-outils, telles que scieries, tours, laminoirs, mull-jenny, etc.

A gauche du cylindre est la boîte à distribution; là, par un mécanisme que nous décrirons ci-après (370), la vapeur passe alternativement, au-dessus et au-dessous du piston. Mais il importe qu'après son action sur chaque face du piston la vapeur disparaisse, sinon il y aurait pression dans les deux sens et le piston demeurerait en en équilibre. Pour cela, la vapeur qui a agi sur le piston se rend dans un vase O, qui contient de l'eau froide, et qu'on nomme *condenseur*. Là, elle se condense à peu près complétement, et la pression cesse dans la partie du cylindre qui communique avec le condenseur. Par conséquent, comme il n'y a pression que sur l'une des faces du piston, celui-ci monte ou descend.

L'emploi du condenseur repose sur ce principe de la théorie des vapeurs, dû à Watt, que quand deux vases communiquant entre eux et contenant de la vapeur à l'état de saturation sont à des températures différentes, la tension est la même dans ces deux vases et correspond à la température du vase le moins chaud (287).

L'eau du condenseur s'échauffant rapidement par la liquéfaction des vapeurs, il faut la renouveler constamment. C'est ce qu'on obtient au moyen de deux pompes : l'une, FM, qu'on appelle *pompe à air*, aspire du condenseur l'eau chaude qu'il contient, et, en même temps, l'air qui était en dissolution dans l'eau du générateur, et qui se rend, avec la vapeur, dans le corps du cylindre et dans le condenseur; l'autre, HR, qu'on nomme *pompe à puits*, aspire, d'un puits ou d'une rivière, de l'eau froide qui est refoulée dans le condenseur par la pression atmosphérique.

Une troisième pompe GQ, qu'on nomme *pompe alimentaire*, refoule, dans le générateur, l'eau chaude aspirée du condenseur, ce qui économise le combustible.

Machine à vapeur à double effet.

(Légende explicative.)

A *Tige du piston* s'articulant au parallélogramme et servant à transmettre au balancier le mouvement de va-et-vient du piston.

B Tige fixée au cylindre et soutenant le bras de rappel C.

Fig. 218 ($h = 4^m,60$).

C *Bras de rappel* double dirigeant le mouvement du parallélogramme.

D, D, E Tringles formant, avec l'extrémité du balancier, un *parallélogramme articulé* auquel est fixée la tige du piston, et qui a pour but de conserver à cette tige un mouvement rectiligne pendant sa course.

F Tige de la *pompe à air* qui enlève du condenseur l'air et l'eau chaude qu'il contient.

G Tige de la *pompe alimentaire* qui refoule dans le générateur, par le tube S, l'eau chaude aspirée du condenseur.

H Tige de la *pompe à puits* qui sert à extraire l'eau froide nécessaire à la condensation.

I *Bielle* qui transmet le mouvement du balancier à la manivelle.

K *Manivelle* qui transmet le mouvement de la bielle à l'arbre de couche.

L *Balancier* mobile en son milieu sur deux tourillons et transmettant le mouvement du piston à la bielle.

M Cylindre de la pompe à air en communication avec le condenseur O.

N Réservoir où arrive l'eau chaude qu'aspire du condenseur la pompe à air.

O *Condenseur* rempli d'eau froide, dans lequel vient se liquéfier la vapeur après qu'elle a agi sur le piston.

P *Piston métallique* mobile dans un cylindre de fonte; c'est ce piston qui reçoit directement la pression de la vapeur, et qui transmet le mouvement à toutes les pièces de la machine.

Q Réservoir d'air (179) de la pompe foulante alimentaire qui envoie l'eau dans la chaudière.

R Réservoir d'eau froide de la pompe à puits.

S Tube qui conduit dans le générateur l'eau chaude refoulée par la pompe alimentaire.

T Tube qui conduit, du réservoir R dans le condenseur, l'eau froide aspirée par la pompe à puits.

U Tube qui conduit la vapeur du cylindre dans le condenseur après qu'elle a agi sur le piston.

V Grande roue en fonte qu'on nomme *volant*, qui tourne avec l'arbre de couche et sert à en régler le mouvement, en vertu de son inertie, surtout quand le piston est au haut et au bas de sa course.

Y Levier coudé qui transmet le mouvement de l'excentrique *e* au tiroir *b*.

Z Tirant de l'excentrique.

a Orifice communiquant, tantôt avec la partie supérieure, tantôt avec la partie inférieure du cylindre, et servant à donner passage à la vapeur pour se rendre par le tube U dans le condenseur.

b Tige transmettant le mouvement au *tiroir*, lequel sert à faire arriver la vapeur tantôt au-dessus tantôt au-dessous du piston, et sera décrit ci-dessous, à l'article *Distribution de vapeur*.

c Orifice par lequel la vapeur du générateur arrive dans la boîte à distribution.

d *Boîte à étoupe* dans laquelle glisse la tige du piston, sans livrer passage à la vapeur.

e *Excentrique* fixé à l'arbre de couche et tournant dans un collier sur lequel s'attache le tirant Z.

m Tringle qui lie la tige *b* du tiroir au levier coudé Y et à l'excentrique.

Dans la figure 218, la partie inférieure du dessin ne représente pas tout à fait la disposition qu'on donne ordinairement aux pompes, au réservoir d'eau chaude et à celui d'eau froide. Les modifications apportées au dessin ont eu pour but de mieux faire comprendre comment ces pièces fonctionnent et communiquent entre elles.

370. **Distribution de vapeur; excentrique.** — La figure 219 représente les détails de la *distribution de vapeur*. Une tubulure *c*, qui se rend à la chaudière, amène la vapeur dans une boîte rectangulaire en fonte fixée sur le cylindre. Dans l'épaisseur de la paroi de ce dernier sont trois orifices, *u*, *n*, *a*; par un conduit inté-

rieur, le premier communique avec la partie supérieure du cylindre; le second, avec la partie inférieure. Sur les trois orifices glisse une pièce *t*, qu'on nomme *glissière* ou *tiroir*. Elle est fixée à une tige *b* articulée en *m* à une tige plus grande *d*, et reçoit avec elle un mouvement de va-et-vient d'un levier coudé *yoS*, en prise avec l'excentrique. Quand le tiroir est au haut de sa course, comme le montre la figure, la vapeur pénètre par l'orifice *n* et se rend dans la partie inférieure du cylindre, tandis que l'orifice *u* étant recouvert par la glissière, la vapeur ne peut y pénétrer; mais celle qui est au-dessus du piston se rend par le même orifice *u* et par l'orifice *a*, dans le

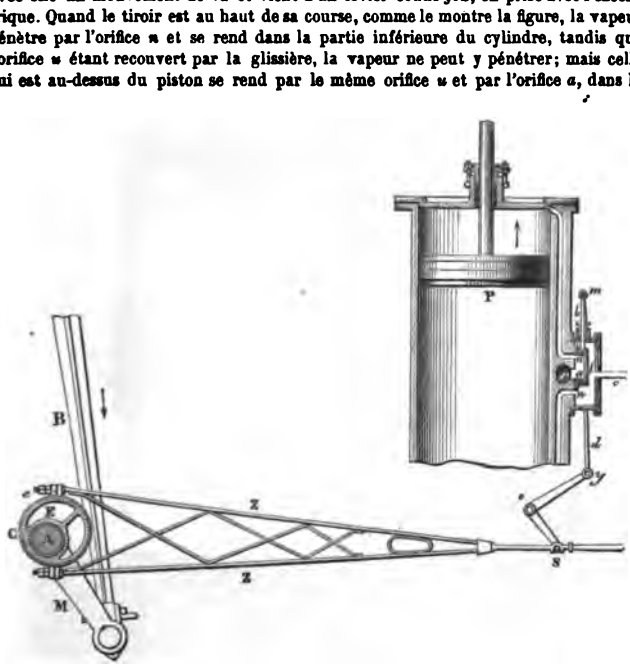


Fig. 219.

trou *r*, d'où elle passe dans le condenseur. Le piston n'est donc pressé que de bas en haut, et monte.

Si, au contraire, le tiroir est au bas de sa course, c'est l'orifice *u* qui laisse entrer la vapeur, et l'orifice *n* qui lui livre passage pour se rendre au condenseur; par conséquent, le piston descend, et ainsi de suite à chaque déplacement du tiroir.

Quant au mouvement de va-et-vient que prend le tiroir, il le reçoit de l'*excentrique*. On nomme ainsi une pièce circulaire E, fixée à l'arbre de couche A, mais de manière que son centre ne coïncide pas avec l'axe de cet arbre. L'excentrique est enveloppé par un collier C dans lequel il tourne à frottement doux. C'est à ce collier que s'attachent les tringles ZZ. Le collier suit, sans tourner, le mouvement de l'excentrique et en reçoit, dans la direction horizontale, un mouvement alternatif qu'il communique au levier *Soy*, et de là au tiroir.

371. **Machine à simple effet.** — On appelle *machine à simple effet* celle dans laquelle la vapeur n'agit que sur la face supérieure du piston; c'est ensuite un

contre-poids, fixé à l'autre extrémité du balancier, qui fait remonter le piston. Ces machines, dont on ne se sert guère aujourd'hui, furent d'abord spécialement employées par Watt à faire marcher des pompes pour l'épuisement de l'eau dans les mines. Dans ce cas, elles sont préférables, par leur simplicité, à la machine à double effet, et on s'en sert encore dans le comté de Cornouailles, en Angleterre.

La figure 220 représente une coupe d'une machine à simple effet. Le balancier BB

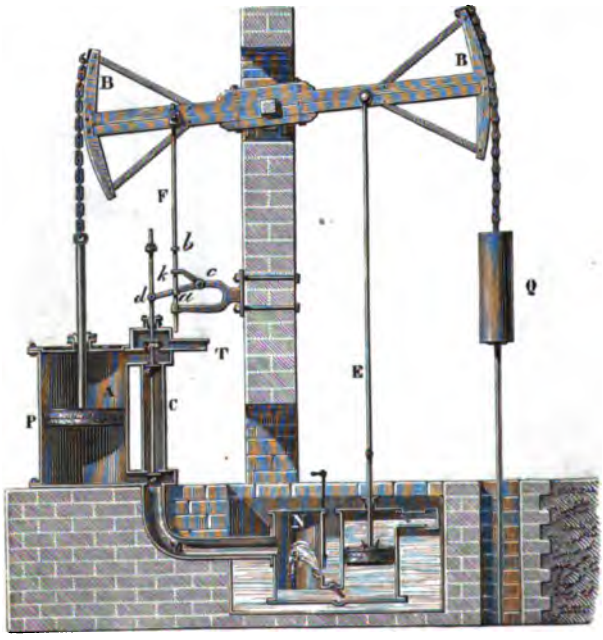


Fig. 220 (h = 9m,50).

est en bois; à ses extrémités sont des secteurs en bois sur lesquels s'enroulent deux chaînes fixées, l'une à la tige du piston P, sur lequel agit la vapeur, l'autre à la tige de la pompe d'épuisement. Sur la droite du cylindre A est la boîte à distribution C, dans laquelle arrive la vapeur de la chaudière par le tube T. Une tige verticale porte trois soupapes *m*, *n*, *o*. Les soupapes *m* et *o* ouvrent de bas en haut, la soupape *n* seule ouvre de haut en bas.

Les soupapes *m* et *o* étant ouvertes, comme le montre le dessin, la vapeur de la chaudière arrive en plein, par le tube T, sur le piston P, tandis que celle qui est au-dessous se rend dans le condensateur N, par le conduit M; alors le piston descend. Or, la tige qui porte les soupapes *m*, *n*, *o* est liée à un levier coudé *dck*, mobile sur une charnière *c*. C'est ce levier coudé qui fait ouvrir et fermer les soupapes. A cet effet, une tringle F, qui est fixée au balancier, porte deux taquets *a* et *b*, au moyen

desquels elle vient buter sur l'extrémité *k* du levier coudé. Dans le dessin ci-dessus, d'après la disposition des soupapes, le piston descend et avec lui la tringle F; par conséquent le taquet *b* va frapper sur le levier et le fait descendre en même temps que la tige *dmo;* alors les soupapes *m* et *o* se ferment, et la soupape *n* s'ouvre. A ce moment, toute communication est interrompue avec la chaudière ainsi qu'avec le condenseur; mais la vapeur qui vient de faire descendre le piston passe librement au-dessous par le conduit G. Pressant alors également les deux faces du piston, elle se fait équilibre à elle-même, et c'est en vertu de la traction exercée par le poids Q que le piston remonte; ce qui demande peu de force, car la pompe d'épuisement, dont la tige est fixée au poids Q, n'exige d'effort que quand son piston remonte. Au moment où le piston P arrive au haut de sa course, le taquet *a* butte à son tour contre le levier *k*, soulève la tige *dmo*, et la vapeur revient sur le piston, qui recommence à descendre, et ainsi de suite.

372. **Locomotives.** — On appelle *machines locomotives*, ou simplement *locomotives*, des machines à vapeur qui, montées sur un train de voiture, se déplacent elles-mêmes en transmettant le mouvement aux roues.

Dans les locomotives, le parallélogramme, le balancier et le volant des machines fixes sont supprimés. La forme du générateur est aussi complétement modifiée. Les parties principales de ces machines sont le *châssis*, la *boîte à feu*, le *corps cylindrique* de la chaudière, la *boîte à fumée*, les *cylindres à vapeur* avec leurs tiroirs, les *roues motrices* et l'*alimentation*.

Le châssis est un cadre de bois de chêne porté par les essieux des roues et soutenant lui-même toutes les parties de la machine. Notre dessin (fig. 221) représente le mécanicien qui dirige la locomotive, monté sur la plate-forme en tôle qui recouvre le châssis, au moment où il se dispose à ouvrir la *prise de vapeur* I, placée dans la partie supérieure de la boîte à feu Z. A la partie inférieure de celle-ci est le foyer, d'où la flamme et les produits de la combustion se rendent dans la boîte à fumée Y, puis dans le tuyau de cheminée, après avoir traversé 125 tubes de cuivre, qui sont entièrement plongés dans l'eau de la chaudière.

La chaudière, qui relie la boîte à feu à la boîte à fumée, est en cuivre rouge, de forme cylindrique et d'un mètre de diamètre environ; elle est entourée de douves d'acajou, qui, par leur faible conductibilité, s'opposent au refroidissement. En sortant de la chaudière, la vapeur se rend dans deux cylindres placés de chaque côté de la boîte à fumée. Là, au moyen d'une distribution analogue à celle décrite ci-dessus (370), elle agit alternativement sur les deux faces des pistons dont les tiges transmettent le mouvement à l'essieu des grandes roues. Cette distribution n'est pas visible dans le dessin, parce qu'elle est placée sous le châssis, entre les deux cylindres. Après avoir agi sur les pistons, la vapeur se dégage par la cheminée, et contribue ainsi à activer le tirage.

La transmission du mouvement des pistons aux deux grandes roues se fait par deux bielles qui, au moyen de manivelles, lient les tiges des pistons à l'essieu de ces roues. Quant au mouvement de va-et-vient du tiroir, dans la boîte à distribution de chaque cylindre, il s'obtient, à l'aide d'excentriques placés sur l'essieu des deux grandes roues.

L'alimentation, c'est-à-dire le renouvellement de l'eau dans la chaudière, s'obtient au moyen de deux pompes aspirantes et foulantes placées sous le châssis et mues par des excentriques. Ces pompes, à l'aide de tubes de communication, aspirent l'eau d'un réservoir placé sous le *tender*. On nomme ainsi la voiture qui suit immédiatement la locomotive et qui porte l'eau et le charbon nécessaires à un parcours déterminé.

La légende qui accompagne le dessin nous dispense d'entrer dans de plus grands développements.

Locomotive à dôme.

(Légende explicative.)

A	Tuyau de cuivre rouge recevant la vapeur par l'extrémité I et se bifurquant à l'autre extrémité pour la conduire aux deux cylindres qui contiennent les pistons moteurs.
B	Poignée du levier de changement de marche. Elle transmet le mouvement à la tringle C, qui le communique à la distribution de vapeur.
C	Tringle du changement de marche.
D	Partie inférieure de la boîte à feu contenant les grilles du foyer.
E	Tuyau d'échappement de la vapeur après qu'elle a agi sur les pistons.
F	Cylindre de fonte renfermant un piston moteur. De chaque côté de la locomotive il y en a un pareil. C'est afin de laisser apercevoir le piston qu'on a dessiné le cylindre entr'ouvert.
G	Tringle qui sert à ouvrir le tiroir I pour laisser passer la vapeur dans le tube A. Dans le dessin, le mécanicien tient à la main le levier qui fait tourner cette tringle.
H	Robinet de vidange de la chaudière.
I	Tiroir s'ouvrant et se fermant à la main pour la prise de vapeur.
K	Grande bielle motrice à fourchette réunissant la tête de la tige du piston à la manivelle M de la grande roue.
L	Lampe et réflecteur servant à indiquer, pendant la nuit, l'approche de la locomotive.
M	Manivelle qui transmet à l'essieu de la grande roue le mouvement du piston.
N	Bouton d'attelage du tender qui suit la locomotive.
O	Porte du foyer par laquelle le chauffeur introduit le coke.
P	Piston métallique dont la tige s'articule à la bielle K.
Q	Tuyau de la cheminée par lequel se dégagent la fumée ainsi que la vapeur qui sort des cylindres.
R, R	Tuyaux conduisant l'eau du tender à deux pompes foulantes qui alimentent la chaudière, mais qui ne sont pas visibles dans le dessin.
S	Chasse-pierre destiné à écarter les pierres ou tout autre objet encombrant la voie.
T, T	Ressorts qui supportent la chaudière.
U, U	Rails en fer maintenus sur la voie par des coussinets de fonte fixés eux-mêmes sur des longrines de bois.
V	Encadrement de la boîte à étoupe des cylindres.
X, X	Corps cylindrique de la chaudière, recouvert de douves d'acajou destinées à diminuer la perte de chaleur par leur faible conductibilité. On voit, au-dessous du tube A, jusqu'où s'élève le niveau de l'eau dans la chaudière. Au milieu même de l'eau sont des tubes de cuivre *a*, dans lesquels passent les produits de la combustion pour se rendre dans la boîte à fumée.
Y	Boîte à fumée dans laquelle débouchent les tubes *a*.
Z, Z	Boîte à feu surmontée d'un dôme dans lequel se rend la vapeur.
a	Tubes de cuivre au nombre de 121, ouverts aux deux bouts et se terminant d'une part à la boîte à feu, de l'autre à la boîte à fumée. Ce sont ces tubes qui transmettent la chaleur du foyer à l'eau de la chaudière et la vaporisent.

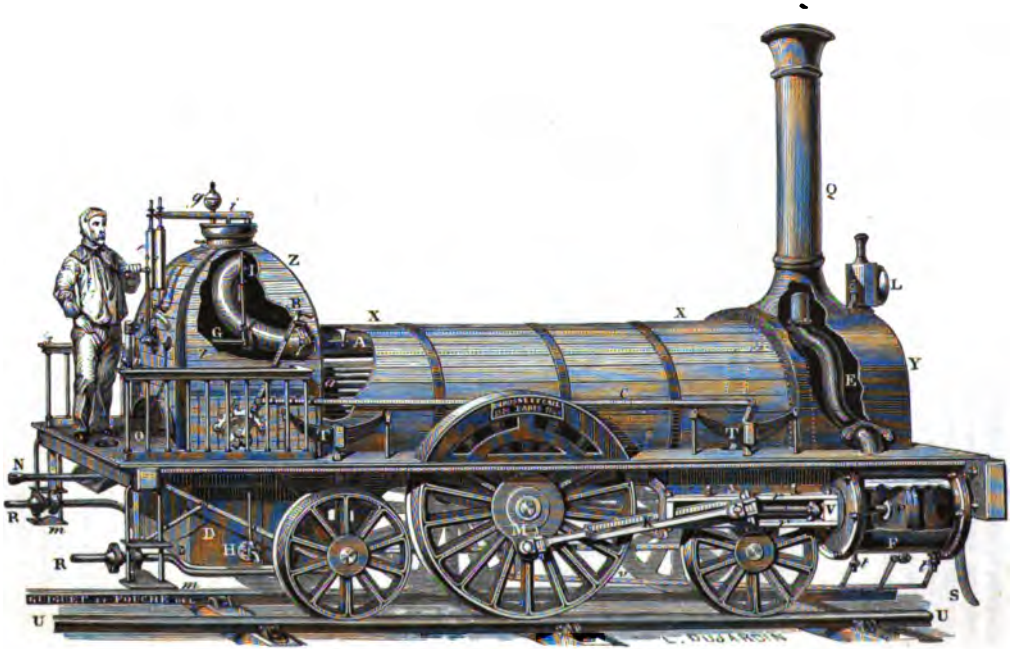


Fig. 221 (1 = 5,m68).

b	Secteur-guide placé sur le côté de la boîte à feu et portant des crans dans lesquels peut engrener le bras du levier B. Le cran extrême d'avant correspond à la marche en avant, le cran extrême d'arrière à la marche en arrière; le cran du milieu est un point mort. Les crans intermédiaires entre celui-ci et les crans extrêmes donnent la détente pour la marche en avant ou en arrière.
e	Étuis contenant des ressorts à boudin qui règlent le jeu des soupapes de sûreté *i*.
g	Sifflet d'alarme se faisant entendre à 2000 mètres.
i	Soupapes de sûreté.
m, *m*	Marchepieds pour monter sur le tablier de la locomotive.
n	Tube de cristal placé devant le mécanicien, et indiquant le niveau de l'eau dans la chaudière, avec laquelle il communique par ses deux bouts.
r, *r*	Guides destinés à maintenir en ligne droite le mouvement de la tête du piston
t, *t*	Robinets de purge après la mise en train et l'échauffement des cylindres.
v	Tringle qui transmet le mouvement aux robinets de purge.

373. **Machines à réaction ; éolipyle.** — On nomme *machines à réaction* des machines dans lesquelles la vapeur agit par réaction, à la manière de l'eau dans

Fig. 222 (h = 18).

le tourniquet hydraulique (85). L'idée de ces machines est déjà bien ancienne; 120 ans avant Jésus-Christ, Héron d'Alexandrie, le même qui inventa la fontaine qui porte son nom, a décrit l'appareil suivant, connu sous le nom d'*éolipyle à réaction*.

C'est une sphère creuse de métal (fig. 222), pouvant tourner librement autour de deux tourillons. Aux extrémités d'un même diamètre sont fixées deux tubulures percées latéralement, en sens contraire, d'orifices par lesquels se dégage la vapeur. Pour introduire de l'eau dans cette sphère, on la chauffe d'abord afin de raréfier l'air, puis on la plonge dans l'eau froide; l'air se contracte et le liquide pénètre dans la boule.

Si l'on chauffe alors l'appareil jusqu'à l'ébullition, la vapeur qui se dégage lui imprime un mouvement rapide de rotation, qui est dû à la pression de la vapeur sur la paroi opposée à l'orifice de sortie.

Diverses tentatives ont été faites dans le but d'utiliser en grand la réaction de la vapeur comme force motrice ; on a aussi essayé de la faire agir par impulsion, en dirigeant un jet de vapeur sur la palette d'une roue tournante ; mais, dans ces différents procédés, la vapeur a toujours été loin de rendre l'effet utile qu'on obtient en la faisant agir par expansion sur un piston.

374. **Machines à basse, à haute et à moyenne pression.** — Une machine est dite à *basse pression*, lorsque la tension de la vapeur ne dépasse pas 1 atmosphère et $\frac{1}{4}$; à *moyenne pression*, lorsque la tension de la vapeur est comprise entre 1 atmosphère $\frac{1}{4}$ et 4 atmosphères ; et à *haute pression*, quand la vapeur agit avec une tension supérieure à 4 atmosphères.

375. **Machines à détente et sans détente.** — Si la vapeur arrive en plein sur le piston, pendant toute la durée de sa course, sa force élastique reste sensiblement le même, et on dit que la vapeur agit *sans détente ;* mais si, par une disposition convenable du tiroir, la vapeur cesse d'arriver sur le piston, lorsque celui-ci est seulement aux deux tiers ou aux trois quarts de sa course, alors *elle se détend*, c'est-à-dire qu'en vertu de sa force expansive, due à sa haute température, elle agit encore sur le piston et achève de lui faire parcourir sa course. De là la distinction de *machines avec détente* et de *machines sans détente*.

Enfin, on appelle *machines à condensation* celles qui sont munies d'un condenseur où la vapeur se liquéfie après qu'elle a agi sur le piston ; et *machines sans condensation* celles qui n'ont pas de condenseur ; telles sont les locomotives.

376. **Cheval-vapeur.** — En mécanique appliquée, on entend par *travail mécanique* d'un moteur le produit de l'effort qu'il exerce par le chemin parcouru par cet effort, et on prend pour unité de travail mécanique le *kilogrammètre*, qui est le travail nécessaire pour élever 1 kilogramme à 1 mètre de hauteur en 1 seconde.

Dans la mesure du travail des machines à vapeur, on prend pour unité le *cheval-vapeur*, qui représente *le travail nécessaire pour élever 75 kilogrammes à 1 mètre de hauteur en 1 seconde ;* c'est-à-dire qu'il équivaut à 75 kilogrammètres. Par conséquent, une machine de 40 chevaux est celle qui peut élever, d'une manière continue, 40 fois 75 kilogrammes, ou 3000 kilogrammes, à 1 mètre de hauteur par seconde. Le travail d'un cheval-vapeur est à peu près double de celui de celui d'un cheval de trait ordinaire.

CHAPITRE XI

SOURCES DE CHALEUR ET DE FROID.

377. **Différentes sources de chaleur.** — Les diverses sources de chaleur sont : 1° les *sources mécaniques*, comprenant le frottement la percussion et la pression ; 2° les *sources physiques*, savoir : la radiation solaire, la chaleur terrestre, les actions moléculaires, les changements d'état et l'électricité ; 3° les *sources chimiques*, c'est-à-dire les combinaisons moléculaires, et notamment la combustion.

Sources mécaniques.

378. **Chaleur due au frottement.** — Le frottement de deux corps l'un contre l'autre développe une quantité de chaleur d'autant plus grande que la pression est plus forte et le mouvement plus rapide. Par exemple, souvent les boîtes des roues de voiture, par leur frottement contre l'essieu, s'échauffent jusqu'à mettre le feu. H. Davy a fondu, en partie, deux morceaux de glace en les frottant l'un contre l'autre dans une atmosphère au-dessous de zéro. En forant, sous l'eau, une masse de bronze, Rumford a trouvé que pour obtenir 250 grammes de limaille, la chaleur développée par le frottement est capable d'élever 25 kilogrammes d'eau de zéro à 100 degrés, ce qui représente 2500 calories (325). A l'Exposition universelle de 1855, MM. Beaumont et Mayer avaient exposé un appareil à l'aide duquel ils élevaient, en quelques heures, 400 litres d'eau, de 10 à 130 degrés, par le frottement d'un cône de bois recouvert de chanvre, et tournant, avec une vitesse de 400 tours par minute, dans un cône de cuivre creux, qui était fixe et plongé dans l'eau d'une chaudière hermétiquement fermée. Les surfaces frottées étaient constamment graissées d'huile.

Dans le briquet à pierre, c'est par l'effet du frottement de l'acier contre le silex que les parcelles métalliques qui se détachent s'échauffent jusqu'à prendre feu dans l'air.

On attribue la chaleur dégagée par le frottement à un mouvement vibratoire que prennent les molécules des corps.

379. **Chaleur due à la pression et à la percussion.** — Si l'on comprime un corps de manière à augmenter sa densité, sa température s'élève d'autant plus que la diminution de volume est plus grande. Peu sensible dans les liquides, ce phénomène l'est davantage dans les solides; mais dans les gaz, qui sont extrêmement compressibles, le dégagement de chaleur est considérable.

On démontre le fort dégagement de chaleur qui se produit dans les gaz comprimés, au moyen du *briquet à air*. Cet instrument se compose d'un tube de verre à paroi épaisse, dans lequel est un piston de cuir fermant hermétiquement (fig. 223). A la base de ce piston est une cavité dans laquelle on place un petit morceau d'amadou. Le tube étant plein d'air, on enfonce brusquement le piston : l'air comprimé s'échauffe alors jusqu'à enflammer l'amadou, qu'on voit brûler si l'on retire rapidement le piston. L'inflammation de l'amadou, dans cette expérience, suppose une température d'au moins

300 degrés. Au moment de la compression, il se produit une lumière assez vive, qu'on a d'abord attribuée à la haute température à laquelle l'air est porté; mais on a reconnu qu'elle est due uniquement à la combustion de l'huile qui graisse le piston.

C'est par l'élévation de température qu'elle fait n'altre que la pression suffit pour déterminer la combinaision et, par suite, la détonation d'un mélange d'oxygène et d'hydrogène.

La chaleur dégagée par la compression s'explique par le rappro-

Fig. 223 (1 = 36).

chement des molécules, qui fait passer une certaine portion de chaleur latente à l'état de chaleur sensible.

La percussion est aussi une source de chaleur, ainsi qu'on le constate en battant un métal malléable sur une enclume. La chaleur alors dégagée n'est pas due seulement au rapprochement des molécules; elle résulte aussi d'un mouvement vibratoire, car le plomb, qui n'augmente pas de densité par la percussion, ne laisse pas que de s'échauffer.

Sources physiques.

380. **Radiation solaire.** — De toutes les sources de chaleur, la plus intense est le soleil. On ignore la cause de la chaleur émise par cet astre, que les uns ont regardé comme une masse embrasée, éprouvant d'immenses éruptions, et que d'autres ont considéré comme étant composé de couches réagissant chimiquement les unes sur les autres, à la manière des couples de la pile voltaïque, et donnant ainsi naissance à des courants électriques auxquels seraient dues la lumière et la chaleur solaires. Dans l'une et l'autre hypothèse, l'incandescence du soleil aurait son terme.

Des tentatives ont été faites pour mesurer la quantité de chaleur

émise annuellement par le soleil. M. Pouillet, au moyen d'un appareil qu'il a nommé *pyrhéliomètre*, a estimé que si la quantité totale de chaleur que la terre reçoit du soleil dans le cours d'une année était tout entière employée à fondre de la glace, elle serait capable d'en fondre une couche d'une épaisseur de près de 31 mètres tout autour du globe. Or, d'après la surface que la terre présente au rayonnement du soleil, et, d'après la distance qui l'en sépare, elle ne reçoit que $\frac{1}{2381000000}$ de la chaleur émise par cet astre.

381. **Chaleur terrestre.** — Le globe terrestre possède une chaleur propre qu'on désigne sous le nom de *chaleur centrale*. En effet, à une profondeur peu considérable, mais qui varie suivant les pays, on rencontre une couche dont la température reste constante dans toutes les saisons ; d'où l'on conclut que la chaleur solaire ne pénètre, au-dessous de cette couche, qu'à une profondeur déterminée. Puis, au-dessous de cette couche, qu'on désigne sous le nom de *couche invariable*, on observe que la température augmente, en moyenne, de 1 degré, à mesure qu'on s'enfonce de 30 à 40 mètres. Cette loi de l'accroissement de la température du sol a été vérifiée, à de grandes profondeurs, dans les mines et dans les puits artésiens. En l'étendant jusqu'à une profondeur de 3500 mètres, c'est-à-dire à un peu moins d'une lieue métrique, la température de la couche correspondante serait déjà de 100 degrés. Les eaux thermales et les volcans confirment l'existence de la chaleur centrale.

La profondeur à laquelle se trouve la couche invariable n'est pas la même sur les différents points du globe : à Paris, elle est de 27 mètres, et, à cette profondeur, la température est constamment de 11°,8.

Diverses hypothèses ont été faites pour expliquer la chaleur centrale. La plus généralement admise par les physiciens et les géologues est celle que la terre a été primitivement à l'état liquide par l'effet d'une température élevée, et que, par le rayonnement, la surface terrestre s'est solidifiée peu à peu, de manière à former une écorce solide qui, actuellement même, n'aurait pas plus de 14 à 15 lieues d'épaisseur, la masse centrale étant encore à l'état liquide. Quant au refroidissement, il ne peut plus être qu'extrêmement lent, en raison de la faible conductibilité des couches terrestres. C'est par la même cause que la chaleur centrale ne paraît pas élever la température de la surface du sol de plus de $\frac{1}{36}$ de degré.

382. **Chaleur dégagée par l'imbibition et par l'absorption.** — Les phénomènes moléculaires, comme l'imbibition (122), l'absorption, les actions capillaires, sont, en général, accompagnés d'un déga-

gement de chaleur. M. Pouillet a trouvé que toutes les fois qu'un liquide est versé sur un solide très-divisé, il y a une élévation de température qui varie selon la nature des substances. Avec les matières inorganiques, comme les métaux, les oxydes, les terres, l'élévation de température est de 2 à 3 dixièmes de degré; mais avec les matières organiques, comme les éponges, la farine, l'amidon, les racines, les membranes desséchées, l'accroissement de température varie de 1 à 10 degrés.

L'absorption des gaz par les corps solides présente le même phénomène. M. Dobereiner a trouvé que si l'on place, dans l'oxygène, du platine très-divisé, comme on l'obtient à l'état de précipité chimique, sous le nom de *noir de platine*, ce métal absorbe plusieurs centaines de fois son volume d'oxygène, et la température s'élève alors assez pour donner naissance à des combustions très-intenses. L'*éponge*, ou *mousse de platine*, qui s'obtient en précipitant le chlorure de platine par le sel ammoniac, produit le même effet. Un jet d'hydrogène dirigé dessus prend feu par le dégagement de chaleur dû à l'absorption.

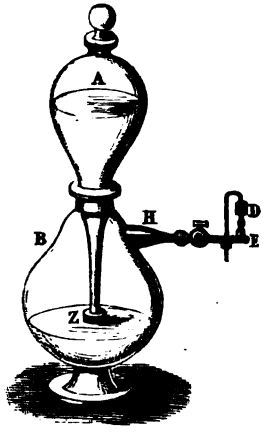


Fig. 224

C'est sur ce principe qu'est fondé le *briquet à mousse de platine*. Cet appareil se compose de deux vases de verre (fig. 224); le premier, A, pénètre dans le vase inférieur B, au moyen d'une tubulure usée à l'émeri, qui le ferme hermétiquement. Au bout de cette tubulure est une masse de zinc Z plongeant dans de l'eau chargée d'acide sulfurique. La réaction de l'eau, de l'acide et du métal, produit un dégagement d'hydrogène qui, ne trouvant d'abord aucune issue, refoule l'eau du vase B dans le vase A jusqu'à ce que le zinc ne plonge plus; le bouchon du vase supérieur est usé latéralement de manière à en laisser sortir l'air à mesure que l'eau s'élève. Une tubulure de cuivre H, fixée sur le côté du vase B, porte un petit cône E percé d'un orifice au-dessus duquel, dans une capsule D, est une éponge de platine.

Cela posé, dès qu'on ouvre le robinet qui ferme le tube de cuivre, l'hydrogène se dégage et s'enflamme au contact du platine.

Il faut avoir bien soin de ne présenter le platine au courant d'hydrogène que lorsque ce gaz a entraîné tout l'air qui peut se trouver dans le vase B; sinon il y aurait une vive détonation due à la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène contenus dans ce vase.

M. Favre, qui a fait récemment des recherches sur la chaleur dégagée lorsqu'un gaz est absorbé par le charbon (123), est arrivé à ce résultat remarquable, que la chaleur maximum dégagée par l'absorption de 1 gramme d'acide sulfureux ou de protoxyde d'azote surpasse de beaucoup la chaleur qui est dégagée par la liquéfaction d'un poids égal des mêmes gaz; pour l'acide carbonique, la chaleur dégagée par l'absorption dépasse même celle qui le serait par la solidification de ce gaz. D'où l'on doit conclure que la chaleur dégagée par l'absorption des gaz ne peut s'expliquer complétement, en admettant que le gaz absorbé se liquéfie et même se solidifie dans les pores du charbon; mais qu'il faut admettre, en outre, une action spéciale entre les molécules du charbon et celles du gaz, action que M. Mitscherlich a désignée sous le nom d'*affinité capillaire*.

La chaleur produite par les changements d'état a déjà été traitée aux articles *Solidification* et *Liquéfaction* (273 et 298); quant à la chaleur développée par l'électricité, cette question trouvera sa place dans la théorie des phénomènes électriques.

Sources chimiques.

383. **Combinaisons chimiques; combustion.** — Les combinaisons chimiques sont généralement accompagnées d'un dégagement de chaleur plus ou moins abondant. Quand elles s'opèrent lentement, comme lorsque le fer s'oxyde à l'air, la chaleur dégagée est insensible: mais si elles se produisent vivement, le dégagement de chaleur est très-intense, et il y a alors combustion.

On nomme *combustion* toute combinaison chimique qui se fait avec dégagement de chaleur et de lumière. Dans les combustions que nous présentent les foyers, les lampes, les bougies, c'est le carbone et l'hydrogène du bois, de l'huile, de la cire, qui se combinent à l'oxygène de l'air. Mais il se produit des combustions dans lesquelles l'oxygène ne joue aucun rôle. Par exemple, si, dans un flacon plein de chlore, on projette de l'antimoine très-divisé, ou des fragments de phosphore, ces corps s'unissent au chlore avec un vif dégagement de lumière et de chaleur.

Plusieurs combustibles brûlent avec flamme. Une *flamme* n'est

autre chose qu'un gaz ou une vapeur portés à une haute température par l'effet de la combustion. Son pouvoir éclairant varie avec les produits qui se forment pendant la combustion. La présence d'un corps solide dans une flamme en augmente le pouvoir éclairant. Les flammes d'hydrogène, d'oxyde de carbone, d'alcool, sont pâles, parce qu'elles ne renferment que des produits gazeux. Mais les flammes des bougies, des lampes, du gaz d'éclairage, ont un grand pouvoir éclairant, parce qu'elles contiennent un excès de carbone qui, n'éprouvant qu'une combustion incomplète, devient incandescent dans la flamme. On donne une intensité beaucoup plus grande à une flamme en y plaçant des fils de platine ou de l'amiante. Il est à observer que la température d'une flamme n'est pas en rapport avec son pouvoir éclairant. La flamme d'hydrogène, qui est la plus pâle, est celle qui dégage le plus de chaleur.

384. **Chaleur dégagée pendant la combustion.** — Plusieurs physiciens, et particulièrement Lavoisier, Rumford, M. Despretz, Dulong, M. Hess, MM. Fabre et Silbermann, se sont occupés de rechercher la quantité de chaleur dégagée par les différents corps, pendant la combustion et pendant les combinaisons.

Pour ces expériences, Lavoisier s'est servi du calorimètre de glace qui a été décrit précédemment (330); Rumford a fait usage d'un calorimètre connu sous son nom, et qui consiste en une cuve rectangulaire, de cuivre, remplie d'eau. Dans cette cuve est un serpentin qui traverse le fond de la caisse, et se termine, en dessous, en forme d'entonnoir renversé. C'est sous cet entonnoir qu'on fait brûler le corps sur lequel on veut expérimenter. Les produits de la combustion, en se dégageant dans le serpentin, échauffent l'eau de la caisse, et d'après l'élévation de température, on apprécie ensuite le calorique dégagé. M. Despretz et Dulong ont successivement modifié le calorimètre de Rumford, en faisant brûler les corps, non plus au-dessous de la cuve qui contient l'eau à échauffer, mais dans une chambre de combustion placée au sein même du liquide; l'oxygène nécessaire à la combustion arrivait, par un tube, à la partie inférieure de la chambre, et les produits de la combustion se dégageaient par un autre tube, placé à la partie supérieure, et contourné en serpentin dans la masse du liquide qu'ils devaient échauffer. Enfin, c'est surtout par MM. Fabre et Silbermann que le calorimètre a été habilement perfectionné, de manière à éviter le plus possible les causes d'erreur, et à pouvoir déterminer non-seulement la quantité de chaleur dégagée dans la combustion, mais aussi dans les autres actions chimiques.

En prenant pour unité de chaleur la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré la température de 1 kilogramme d'eau, Dulong a trouvé qu'un kilogramme des substances suivantes dégage, en brûlant, les nombres d'unités compris dans ce tableau :

Hydrogène	34600	Houille moyenne	7600
Hydrogène protocarboné	13205	Carbone pur	7295
— bicarboné	12032	Alcool à 42° de Baumé	6855
Essence de térébenthine	10836	Bois très-sec	3652
Huile d'olive	9862	Soufre	2601
Éther sulfurique	9430	Oxyde de carbone	2488

Les nombres trouvés antérieurement par d'autres physiciens différaient quelquefois beaucoup de ceux obtenus par Dulong, surtout pour le carbone, mais aujourd'hui la concordance très-approchée entre les résultats trouvés par MM. Fabre et Silbermann et ceux de Dulong, montre l'exactitude des nombres obtenus par ce physicien.

Les expériences de Dulong, de M. Despretz et de M. Hess conduisent à ce principe, qu'un corps qui brûle produit toujours la même quantité de chaleur pour arriver au même degré d'oxydation, soit qu'il l'atteigne immédiatement, soit qu'il n'y arrive que progressivement. Par exemple, un gramme de carbone qui se transforme directement en acide carbonique, dégage la même quantité de chaleur que s'il était transformé d'abord en oxyde de carbone, puis celui-ci en acide carbonique.

CHAUFFAGE.

385. **Différentes sortes de chauffage.** — Le *chauffage* est un art qui a pour objet d'utiliser, dans l'économie domestique et dans l'industrie, les sources de chaleur que nous offre la nature.

La source de chaleur principalement en usage jusqu'à nos jours est la combustion du bois, du charbon, de la houille, du coke, de la tourbe et de l'anthracite.

D'après les appareils qui servent à la combustion, on peut distinguer cinq sortes de chauffages : 1° le chauffage à foyer extérieur comme les cheminées; 2° le chauffage à foyer intérieur comme les poêles; 3° le chauffage par l'air chaud; 4° le chauffage par la vapeur; 5° le chauffage par circulation d'eau chaude. Nous allons successivement faire connaître ces différents procédés d'une manière très-succincte.

386. **Cheminées.** — Les *cheminées* sont des foyers ouverts,

adossés à un mur, et surmontés d'un tuyau par lequel se dégagent les produits de la combustion. L'invention des cheminées paraît dater du premier siècle de l'ère chrétienne. Dans des temps plus reculés, le foyer était placé au milieu de la pièce à chauffer, et la fumée s'échappait par une ouverture pratiquée sur le comble des habitations. C'est pourquoi Vitruve défend d'enrichir d'ouvrages somptueux les appartements d'hiver, afin qu'ils ne soient pas endommagés par la fumée et par la suie.

Les premières cheminées, quoique placées contre des murs, n'étaient pas entourées de chambranles, mais seulement surmontées d'une *hotte* qui donnait dégagement à la fumée. Ce n'est que dans les temps modernes qu'on a donné aux cheminées la forme qu'elles ont aujourd'hui. Ce sont des physiciens qui les ont successivement perfectionnées, et particulièrement Philibert Delorme, Ganger, Franklin et Rumford.

Quelques perfectionnements qu'on ait apportés à la construction des cheminées, elles sont encore le mode de chauffage le plus imparfait et le plus dispendieux, car elles n'utilisent, avec le bois, qu'environ 6 pour 100 de la chaleur totale dégagée par le combustible, et 13 avec le coke et la houille. Cette perte énorme de calorique provient de ce que le courant d'air nécessaire à la combustion entraînant toujours une portion considérable de la chaleur produite, celle-ci va se perdre en grande partie dans l'atmosphère. C'est ce qui avait fait dire à Franklin que si l'on voulait, pour une quantité de combustible donnée, obtenir le moins de chaleur possible, il faudrait adopter les cheminées. Néanmoins, elles sont et seront toujours le mode de chauffage le plus agréable et le plus sain, par la présence du feu et par le renouvellement continu qu'elles entretiennent dans l'air des appartements.

387. **Tirage des cheminées.** — On entend par *tirage* d'une cheminée un courant de bas en haut qui s'établit dans le tuyau par l'effet de l'ascension des produits de la combustion; quand le courant est rapide et continu, on dit que la cheminée *tire* bien.

Le tirage a pour cause la différence de température à l'intérieur du tuyau et à l'extérieur; car, en vertu de cette différence, les matières gazeuses qui remplissent le tuyau étant moins denses que l'air de l'appartement, l'équilibre est impossible (159). En effet, le poids de la colonne gazeuse CD (fig. 225), dans le tuyau, étant moindre que celui de la colonne d'air extérieur AB, de même hauteur, il en résulte, de l'extérieur vers l'intérieur, un excès de pression qui refoule les produits de la combustion d'autant plus rapi-

dement que la différence de poids entre les deux masses gazeuses est plus grande.

On constate très-bien l'existence des courants que font naître, dans les gaz, les différences de température, au moyen de l'expérience suivante : on ouvre une porte mettant en communication une pièce échauffée avec une qui ne l'est pas, puis on tient, vers le haut de la porte, une bougie allumée; on voit alors la flamme se diriger de la pièce chaude vers la pièce froide. Au contraire, si l'on pose la bougie sur le sol, la flamme se dirige de la pièce froide vers la pièce chaude. Ces deux effets sont dus à un courant d'air chaud qui s'échappe par le haut de la porte, tandis que l'air froid, qui vient le remplacer, rentre par le bas.

Fig. 225.

Pour avoir un bon tirage, une cheminée doit satisfaire aux conditions suivantes :

1° La section du tuyau doit avoir la dimension strictement nécessaire pour l'écoulement des produits de la combustion; autrement, si cette section est trop grande, il s'établit, à la fois, des courants ascendants et des courants descendants, et la cheminée fume. Il est bon de placer au sommet du tuyau une buse conique, plus étroite que lui, afin que la fumée sorte avec une vitesse suffisante pour résister à l'action du vent.

2° Le tuyau de la cheminée doit être suffisamment élevé, car le tirage ayant pour cause l'excès de la pression extérieure sur la pression intérieure dans le tuyau, cet excès de pression sera d'autant plus grand que la colonne d'air échauffée sera plus haute.

3° L'air extérieur doit pouvoir pénétrer dans l'appartement où est la cheminée, assez rapidement pour répondre à l'appel du foyer. Dans un appartement hermétiquement fermé, le combustible ne brûlerait pas, ou il s'établirait des courants d'air descendants qui rabattraient la fumée dans l'appartement. L'air rentre ordinairement en quantité suffisante par les joints des portes et des croisées.

4° On doit toujours éviter de faire communiquer entre eux deux tuyaux de cheminée, car si l'un tire plus que l'autre, il se produit,

dans ce dernier, un courant d'air descendant qui ramène la fumée.

388. **Poêles.** — Les *poêles* sont des appareils de chauffage à foyer isolé, placés au milieu même de la masse d'air qu'on veut échauffer, en sorte que le calorique rayonne dans toutes les directions autour du foyer. A la partie inférieure est la prise d'air nécessaire à la combustion, dont les produits se dégagent, à la partie supérieure, par des tuyaux de tôle plus ou moins longs. Ces produits gazeux sortant ainsi très-refroidis, on parvient à utiliser la presque totalité de la chaleur développée; aussi ce mode de chauffage est-il le plus économique; mais il est loin d'être aussi salubre que les cheminées, car il ne donne qu'une ventilation très-faible, et même nulle, quand la prise d'air se fait à l'extérieur, comme cela a lieu dans les poêles suédois. Les poêles ont, en outre, l'inconvénient de répandre une odeur désagréable et nuisible, surtout lorsqu'ils sont en fonte ou en tôle, ce qui doit probablement être attribué à la décomposition des matières organiques qui sont dans l'air par leur contact avec les parois chaudes des tuyaux.

Avec les poêles de métal noirci, qui ont un grand pouvoir émissif, le chauffage est plus rapide; mais ces poêles se refroidissent très-vite. Les poêles de faïence blanche et polie, dont le pouvoir émissif est faible, donnent un chauffage plus lent, mais plus prolongé et plus doux.

389. **Chauffage par la vapeur.** — La propriété qu'ont les vapeurs de restituer leur calorique de vaporisation, lorsqu'elles se condensent, a été utilisée pour le chauffage des bains, des ateliers, des édifices publics, des serres, des étuves. Pour cela, on produit la vapeur dans des chaudières analogues à celle qui a été décrite à l'article *Générateur de vapeur* (fig. 217); puis on la fait circuler dans des tuyaux placés dans le lieu qu'il s'agit de chauffer. La vapeur se condense dans ces tuyaux et leur cède tout son calorique latent, qui devient libre au moment de la condensation. Ce calorique se transmet ensuite à l'air extérieur ou au liquide dans lequel sont placés les tuyaux de conduite.

390. **Chauffage à air chaud.** — Le chauffage à air chaud consiste à chauffer de l'air dans la partie inférieure d'un édifice, et à le laisser ensuite s'élever jusqu'aux étages supérieurs, en vertu de sa moindre densité, dans des tuyaux de conduite placés dans les murs. L'appareil est disposé comme le montre la figure 226. Un fourneau F, construit dans les caves, contient, à la suite les uns des autres, un système de tubes recourbés AB, dont un seul est visible dans le dessin. C'est par l'orifice inférieur A, qui est la *prise d'air*,

que l'air extérieur pénètre dans le tube; là, il s'échauffe, et s'élevant dans le sens des flèches, il pénètre dans les appartements M par l'orifice supérieur B, qu'on nomme *bouche de chaleur*.

Dans les différents étages, chaque pièce a ainsi une ou plusieurs bouches de chaleur, qui se placent le plus bas possible, l'air chaud tendant toujours à monter.

Le conduit O est un tuyau de cheminée ordinaire par lequel se dégagent du fourneau les produits de la combustion.

Ces appareils, connus sous le nom de *calorifères*, sont beau-

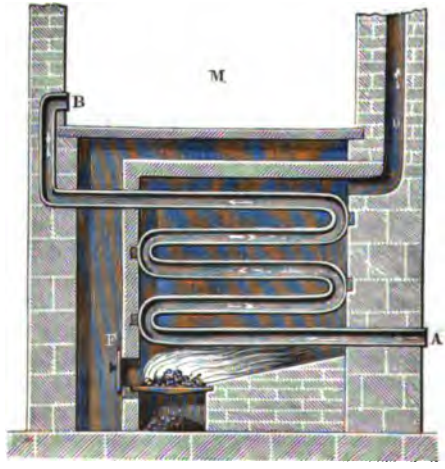


Fig. 226.

coup plus économiques que les cheminées, mais ils ne peuvent ventiler aussi bien l'air des appartements, et, par conséquent, sont moins salubres.

394. **Chauffage par circulation d'eau chaude.** — Le chauffage par circulation d'eau chaude consiste en un mouvement circulatoire continu d'eau qui, après s'être échauffée dans une chaudière, s'élève dans une série de tubes; puis, après s'être refroidie, revient à la chaudière par une série semblable.

Le premier appareil propre à ce genre de chauffage fut inventé par Bonnemain, en France, vers la fin du siècle dernier; mais c'est M. Léon Duvoir qui a donné à ces appareils la forme qu'ils ont

aujourd'hui. La figure 227 représente la disposition adoptée par cet ingénieur pour chauffer un édifice de plusieurs étages. L'appareil de chauffage, qui est dans les caves, consiste en une chaudière *oo*, en forme de cloche, et à foyer intérieur F. A la partie supérieure de la chaudière est fixé un long tube M, qui se rend à un réservoir Q, placé dans les combles de l'édifice qu'on veut chauffer. Ce réservoir porte, à sa partie supérieure, une tubulure *n* fermée

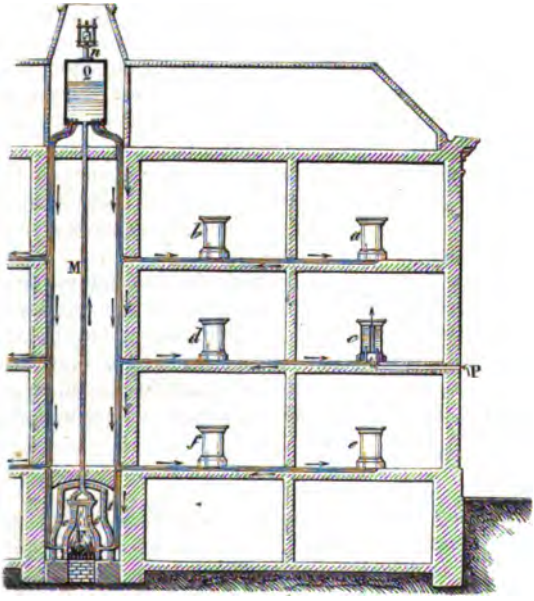


Fig. 227.

par une soupape *s* qu'on charge plus ou moins, de manière à limiter la tension de la vapeur dans l'intérieur de l'appareil.

Cela posé, la chaudière et le tube M étant remplis d'eau, ainsi qu'une partie du réservoir Q, à mesure que l'eau s'échauffe dans la chaudière, il se produit, dans le tube M, un courant ascendant d'eau chaude jusqu'au réservoir Q, tandis qu'en même temps s'établissent des courants descendants d'eau moins chaude et plus dense, partant de la partie inférieure du réservoir Q, et se rendant respectivement par autant de tubes dans des récipients *b*, *d*, *f*

remplis d'eau. Puis de ceux-ci partent de nouveaux tubes dans lesquels le courant descendant se continue jusqu'à d'autres récipients *a*, *c*, *e*; puis enfin, de ces derniers le courant se continue, par des tubes de retour, jusqu'à la partie inférieure de la chaudière.

Pendant ce double parcours, l'eau chaude cédant successivement son calorique sensible aux tubes et aux récipients, ceux-ci s'échauffent et deviennent de véritables poêles à eau. On en détermine facilement le nombre et les dimensions, pour chauffer un espace donné, en s'appuyant sur cette donnée de l'expérience et de la théorie, qu'un litre d'eau suffit pour communiquer la chaleur nécessaire à 3200 litres d'air. Deux de ces poêles peuvent, pendant les froids, entretenir 600 à 700 mètres cubes d'air à une température de 15 degrés.

Dans l'intérieur des récipients *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, sont des tubes de fonte remplis d'air pris à l'extérienr par des tubes P, placés au-dessous du plancher. Cet air s'échauffe dans les tubes et se dégage ensuite à la partie supérieure des récipients.

Le principal avantage de ce mode de chauffage est de donner une température sensiblement constante pendant fort longtemps, la masse d'eau contenue dans les récipients et dans les tubes ne se refroidissant que lentement; aussi l'usage en est-il très-répandu pour les serres, les étuves, l'incubation artificielle, et, en général, dans tous les cas où on a besoin d'une température uniforme.

* SOURCES DE FROID.

392. **Diverses sources de froid.** — Les causes de froid sont : le passage de l'état solide à l'état liquide par les actions chimiques, l'évaporation, la dilatation des gaz, le rayonnement en général, et particulièrement le rayonnement nocturne. Ayant déjà fait connaître les deux premières causes (271, 277 et 297), nous ne parlerons ici que des deux dernières.

393. **Froid produit par la dilatation des gaz.** — On a vu (379) que par la compression des gaz, une partie de la chaleur latente devenant livre, la température s'élève. Réciproquement, la raréfaction d'un gaz est accompagnée d'un abaissement de température, parce qu'ici une certaine quantité de chaleur libre devient latente. Pour le démontrer, on place le thermomètre de Bréguet (243) sous le récipient de la machine pneumatique, et on fait le vide; à chaque coup de piston, l'aiguille avance vers le zéro, puis revient aussitôt.

On a remarqué que le froid produit par la dilatation d'un gaz est généralement moindre que la chaleur produite par sa compression; ce qui s'explique parce que la chaleur cédée par les parois du corps de pompe, dans le premier cas, est plus grande que celle qu'elles absorbent dans le second, puisque le piston, en se retirant, met le gaz en contact avec une surface de plus en plus grande.

394. **Froid produit par le rayonnement nocturne.** — Pendant le jour, la surface du sol reçoit du soleil plus de chaleur qu'elle n'en émet vers les espaces célestes, et sa température s'élève. C'est l'inverse pendant la nuit. La chaleur que perd alors la terre par le rayonnement n'est plus compensée, et de là résulte un abaissement de température d'autant plus grand que le ciel est moins nuageux; car, lorsqu'il y a des nuages, ceux-ci émettent vers le sol des rayons d'une intensité bien moins faible que celle des rayons venant des espaces célestes. On observe, en effet, dans certains hivers, que les rivières ne gèlent pas, quoique le thermomètre soit pendant plusieurs jours au-dessous de — 4 degrés, le ciel étant couvert; tandis que, dans d'autres hivers moins rigoureux, les rivières gèlent lorsque le ciel est serein. Le pouvoir émissif (352) a aussi une grande influence sur le refroidissement produit par le rayonnement nocturne; plus ce pouvoir est grand, plus le refroidissement est considérable.

On verra plus tard, dans la Météorologie, que c'est le refroidissement dû au rayonnement nocturne qui est la cause du phénomène de la rosée.

Au Bengale, le refroidissement nocturne est utilisé pour obtenir artificiellement de la glace. A cet effet, pendant les nuits sereines, on expose sur le sol, en ayant soin de les isoler sur des substances non conductrices, comme de la paille ou des feuilles sèches, de grands vases plats, remplis d'eau. Là, par l'effet du rayonnement nocturne, ces vases se refroidissent assez pour que l'eau se congèle, même quand l'air est à 10 degrés au-dessus de zéro. Le même procédé peut évidemment être employé avec succès partout où le ciel est serein.

On rapporte que les Péruviens, pour préserver de la gelée les pousses des jeunes plantes, allumaient, en avant du lieu qu'ils voulaient protéger, de grands feux dont la fumée, produisant un nuage artificiel, s'opposait au refroidissement occasionné par le rayonnement nocturne. Ce procédé a été essaye récemment en France; il est surtout à expérimenter dans nos pays vignobles.

LIVRE VII

DE LA LUMIÈRE.

CHAPITRE PREMIER

TRANSMISSION, VITESSE ET INTENSITÉ DE LA LUMIÈRE.

395. **Lumière; hypothèses sur sa nature.** — La *lumière* est l'agent qui produit en nous, par son action sur la rétine, le phénomène de la vision. La partie de la physique qui fait connaître les propriétés de la lumière est désignée sous le nom d'*optique*.

Pour expliquer l'origine de la lumière, on a adopté les mêmes hypothèses que pour la chaleur : celle de l'*émission* et celle des *ondulations*. Dans la première, soutenue par Newton, on admet que les corps lumineux émettent dans toutes les directions, sous la forme de molécules d'une extrême ténuité, une substance impondérable qui se propage en ligne droite avec une vitesse presque infinie. Ces molécules, en pénétrant dans l'œil, réagissent sur la rétine et déterminent la sensation qui constitue la vision.

Dans l'hypothèse des ondulations, soutenue par Grimaldi, Descartes, Huygens, Young, Malus et Fresnel, on admet que les molécules des corps lumineux sont animées d'un mouvement vibratoire infiniment rapide qui se communique à un fluide éminemment subtil et élastique qu'on nomme *éther*, et qui est répandu dans tout l'univers. Dans cette hypothèse, un ébranlement en un point quelconque de l'éther se propage dans tous les sens sous la forme d'ondes sphériques lumineuses, de la même manière que le son est propagé dans l'air par les ondes sonores. Toutefois, on admet que les vibrations de l'éther se produisent, non pas perpendiculairement à la surface de l'onde lumineuse, comme dans la propagation du son, mais suivant cette surface même, c'est-à-dire perpendiculairement à la direction que suit la lumière en se propageant; ce qu'on exprime en disant que les vibrations sont *transversales*. On peut se former une idée de ces vibrations en secouant une corde par l'un des bouts : le mouvement se propage en serpentant jus-

qu'à l'autre bout; la propagation se fait donc dans le sens de la corde, mais les vibrations se font en travers.

Dans le système des ondulations, Fresnel est parvenu à donner une explication complète de plusieurs phénomènes lumineux, tels que ceux de la *diffraction* et des *anneaux colorés*, qu'on ne pouvait expliquer dans le système de l'émission. Aussi la théorie des ondulations est-elle généralement la seule admise depuis les travaux de Fresnel.

396. **Corps lumineux, diaphanes, translucides, opaques.** — On nomme *corps lumineux* ceux qui émettent de la lumière, comme le soleil et les corps en ignition; *corps diaphanes* ou *transparents*, ceux qui laissent facilement passer la lumière, et au travers desquels on distingue les objets : tels sont l'eau, les gaz, le verre poli. Les *corps translucides* sont ceux au travers desquels on perçoit encore la lumière, mais sans pouvoir reconnaître la forme des objets : tels sont le verre dépoli, le papier huilé. Enfin, on appelle *corps opaques* ceux au travers desquels il n'y a pas transmission de lumière, comme les bois, les métaux. Toutefois, il n'y a pas de corps complétement opaque; tous sont plus ou moins translucides lorsqu'ils sont réduits en feuilles assez minces.

397. **Rayon et faisceau lumineux.** — On appelle *rayon lumineux* la ligne que suit la lumière en se propageant, et *faisceau lumineux* un ensemble de rayons émis d'une même source. Un faisceau lumineux est dit *parallèle* lorsqu'il est composé de rayons parallèles; il est *divergent* lorsque les rayons s'écartent les uns des autres et *convergent* quand les rayons concourent vers un même point. Tout corps lumineux émet, de tous ses points et dans toutes les directions, des rayons rectilignes divergents.

398. **Propagation de la lumière dans un milieu homogène.** — Un *milieu* est l'espace plein ou vide dans lequel se produit un phénomène. L'air, l'eau, le verre, sont des milieux dans lesquels se propage la lumière. Un milieu est dit *homogène* lorsqu'en toutes ses parties sa composition chimique et sa densité sont les mêmes.

Cela posé, *dans tout milieu homogène, la lumière se propage en ligne droite*. En effet, si l'on interpose un corps opaque sur la ligne droite qui joint l'œil à un corps lumineux, la lumière est interceptée. On peut remarquer encore que la lumière qui pénètre dans une chambre noire, par une petite ouverture, trace dans l'air un trait lumineux rectiligne, qui devient visible en éclairant les poussières légères qui sont en suspension dans l'atmosphère.

Toutefois, la lumière change de direction lorsqu'elle rencontre

un obstacle qu'elle ne peut pénétrer, ou lorsqu'elle passe d'un milieu dans un autre; ces phénomènes seront décrits bientôt sous les noms de *réflexion* et de *réfraction*.

399. **Ombre, pénombre, reflet.** — L'*ombre* d'un corps est le lieu de l'espace où il empêche la lumière de pénétrer. Lorsqu'il s'agit de déterminer l'étendue et la forme de l'ombre projetée par un corps, on peut distinguer deux cas : celui où la source lumineuse est un point unique, et celui où elle est un corps d'une étendue quelconque.

Dans le premier cas, soient S (fig. 228) le point lumineux, et

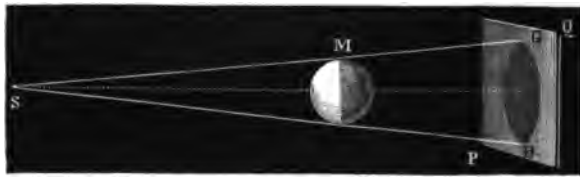


Fig. 228.

M le corps qui porte ombre et que nous supposerons sphérique. Si l'on conçoit qu'une droite indéfinie SG se meuve autour de la sphère M, en lui restant tangente et en passant constamment par le point S, cette droite engendre une surface conique qui, au delà de la sphère, sépare la portion de l'espace qui est dans l'ombre de celle qui est éclairée. Dans le cas que nous considérons, en plaçant au delà du corps opaque un écran PQ, le passage de l'ombre à la lumière sur cet écran aurait lieu brusquement; mais ce n'est pas ce qui a lieu dans les cas ordinaires, où les corps lumineux ont toujours une certaine étendue.

Supposons, en effet, pour simplifier la démonstration, que le corps éclairant et le corps éclairé soient deux sphères SL et MN (fig. 229). Si l'on conçoit qu'une droite indéfinie AG se meuve tangentiellement à ces sphères, en coupant constamment la ligne des centres au point A, elle engendre une surface conique qui a pour sommet ce point, et qui limite, derrière la sphère MN, un espace MGHN complétement privé de lumière. Si, actuellement, une seconde droite LD, coupant la ligne des centres en B, tourne encore tangentiellement aux deux sphères de manière à engendrer une nouvelle surface conique BDC, on reconnaît, à l'inspection de la figure, que tout l'espace extérieur à cette surface est complète-

ment éclairée, mais que la partie comprise entre le deux surfaces coniques n'est ni complétement privée de lumière ni complétement éclairée. En sorte que si l'on place un écran PQ derrière le corps opaque, la portion *c*G*d*H de cet écran est complétement dans l'ombre; quant à la partie annulaire *ab*, il est facile de voir qu'elle reçoit de la lumière de certains points du corps lumineux, mais n'en reçoit pas de tous. Cette portion de l'écran est donc plus éclairée que l'ombre proprement dite, mais moins que le reste de l'écran; c'est pourquoi on lui donne le nom de *pénombre.*

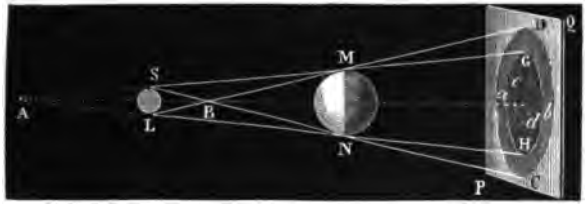


Fig. 229.

Les ombres telles qu'on vient de les construire sont les *ombres géométriques;* mais les *ombres physiques*, c'est-à-dire celles qu'on observe réellement, ne sont pas aussi rigoureusement limitées. On remarque, en effet, qu'une certaine quantité de lumière passe dans l'ombre, et que réciproquement de l'ombre se trouve dans la partie éclairée. Ce phénomène, qui sera décrit plus tard, est connu sous le nom de *diffraction* (521).

Lorsqu'un corps opaque intercepte la lumière par une de ses faces, la face opposée n'est jamais complétement obscure; elle est toujours plus ou moins éclairée par la lumière que réfléchissent les corps voisins. C'est l'effet de cette réverbération qu'on nomme *reflet.* Or, la lumière réfléchie par un corps coloré participant, en général, de la couleur propre de ce corps, il en résulte que les reflets prennent eux-mêmes la teinte des objets environnants. Les peintres dans leurs tableaux, les décorateurs dans le choix des draperies, les femmes dans celui de leurs parures, utilisent avec art les effets de lumière que présentent les reflets.

* 400. **Images produites par les petites ouvertures.** — Lorsqu'on reçoit, sur un écran blanc, les rayons lumineux qui pénètrent dans une chambre noire *par une petite ouverture*, on obtient, des objets extérieurs, des images qui présentent les phénomènes sui-

vants : 1° elles sont renversées; 2° leur forme, qui est toujours celle des objets extérieurs, est indépendante de la forme de l'ouverture.

Le renversement des images résulte de ce que les rayons lumineux qui proviennent des objets extérieurs et pénètrent dans la chambre noire, se croisent en passant dans l'ouverture, comme le

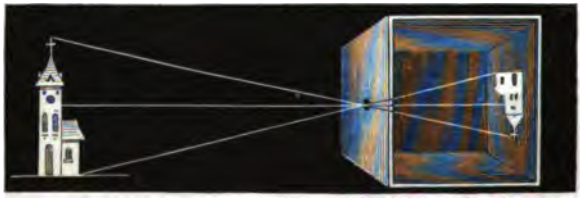


Fig. 230.

montre la figure 230. Continuant à se propager en ligne droite, les rayons partis des points les plus élevés rencontrent l'écran aux points les plus bas, et réciproquement ceux qui viennent des points inférieurs rencontrent l'écran aux points les plus hauts. De là le renversement de l'image. A l'article *Chambre obscure* (472), on verra comment on augmente l'éclat et la netteté des images au moyen de verres convergents, et par quels procédés on les redresse.

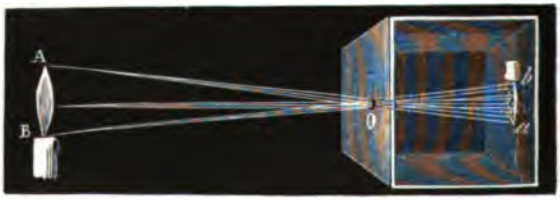


Fig. 231.

Pour montrer comment la forme de l'image est indépendante de celle de l'ouverture, lorsque celle-ci est suffisamment petite et que l'écran est assez éloigné, soit une ouverture triangulaire O (fig. 231), pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, et soit un écran *ab* sur lequel on reçoit l'image d'une flamme AB placée à l'extérieur. De chaque point de la flamme pénètre, dans la chambre noire, un faisceau divergent qui vient former, sur l'écran, une image triangu-

laire semblable à l'ouverture, comme le montre le dessin. Or, c'est la réunion de toutes ces images partielles qui produit une image totale de même forme que l'objet éclairant. En effet, si l'on conçoit qu'une droite indéfinie se meuve dans l'ouverture du volet, supposée très-petite, avec la condition que cette droite reste toujours tangente à l'objet lumineux AB, on peut admettre que, dans son mouvement, la droite décrit deux cônes ayant pour sommet l'ouverture même de la chambre noire, et pour base, l'un le corps lumineux, l'autre la partie éclairée de l'écran, c'est-à-dire l'image. Par conséquent, si l'écran est perpendiculaire à la droite qui joint le centre de l'ouverture au centre du corps lumineux, l'image est semblable à ce corps; mais si l'écran est oblique, l'image est allongée dans le sens de l'obliquité. C'est ce qu'on observe, par exemple, dans l'ombre portée par le feuillage des arbres: les faisceaux lumineux qui passent à travers les feuilles donnent des images du soleil, qui sont rondes ou elliptiques, suivant que le sol sur lequel elles se projettent est perpendiculaire ou oblique aux rayons solaires, et cela quelle que soit, entre les feuilles, la forme des intervalles à travers lesquels passe la lumière.

401. Vitesse de la lumière. — La lumière se propage avec une vitesse telle qu'on ne peut, à la surface de la terre, constater aucun intervalle appréciable, quelle que soit la distance, entre l'instant où un phénomène lumineux se produit et celui où l'œil le perçoit :

Fig. 232.

aussi est-ce au moyen d'observations astronomiques que cette vitesse a d'abord été déterminée. C'est Rœmer, astronome danois, qui, le premier, en 1675, déduisit la vitesse de la lumière de l'observation des éclipses du premier satellite de Jupiter.

On sait que Jupiter est une planète autour de laquelle tournent avec rapidité quatre satellites, de la même manière que la lune tourne autour de la terre. Son premier satellite E (fig. 232) fait ses

immersions, c'est-à-dire entre dans l'ombre projetée par Jupiter J, à des intervalles de temps égaux, qui sont de $42^h\ 28^m\ 36^s$. Tant que la terre T se trouve dans la partie *ab* de son orbite, c'est-à-dire sensiblement à la même distance de Jupiter, on remarque que les intervalles entre deux immersions consécutives restent constants; mais à mesure qu'elle s'en éloigne, en tournant autour du soleil S, l'intervalle entre deux immersions croît, et lorsqu'au bout de six mois la terre est passée de la position T dans la position T', on observe un retard total de $16^m\ 36^s$ entre l'instant où apparaît le phénomène et celui où, d'après le calcul, il a réellement eu lieu. Or, lorsque la terre était dans la position T, pour arriver jusqu'à elle, la lumière solaire réfléchie par le satellite E avait à parcourir la distance ET, tandis que dans la seconde position T' la lumière doit parcourir la distance ET', qui surpasse la première de la quantité TT', puisque les rayons ET et ET' peuvent être regardés comme parallèles, vu la grande distance du satellite E. Il faut donc à la lumière $16^m\ 36^s$ pour parcourir le diamètre TT' de l'orbite terrestre, c'est-à-dire deux fois la distance de la terre au soleil, ce qui, d'après cette distance, représente une vitesse, par seconde, d'environ 77 000 lieues de 4 000 mètres.

Les étoiles les plus rapprochées de la terre sont au moins 206 265 fois plus éloignées que le soleil. La lumière qu'elles nous envoient met donc plus de 3 années et $\frac{1}{4}$ pour arriver jusqu'à nous. Quant aux étoiles qui ne sont visibles qu'à l'aide du télescope, elles sont à une telle distance de la terre qu'il faut des milliers d'années pour que leur lumière arrive jusqu'à notre système planétaire. Ces astres seraient donc éteints depuis des siècles, que nous continuerions à les contempler et à étudier leur mouvement.

*** 402. Appareil de M. Foucault pour mesurer la vitesse de la lumière.** — Malgré la prodigieuse vitesse de la lumière, M. Foucault est parvenu à la déterminer expérimentalement à l'aide d'un ingénieux appareil fondé sur l'emploi du miroir tournant, déjà adopté par M. Wheatstone pour mesurer la vitesse de l'électricité.

Avant de décrire cet appareil, il importe d'observer que ce qui suit suppose connues les propriétés des miroirs et des lentilles, données plus bas aux paragraphes 417 et 441. La figure 233 représente, en plan horizontal, les principales dispositions de l'appareil de M. Foucault. Le volet K d'une chambre obscure est percé d'une ouverture carrée derrière laquelle est tendu verticalement un fil de platine *o*. Un faisceau de lumière solaire, réfléchi extérieurement sur un miroir, pénètre dans la chambre obscure par l'ouverture carrée, rencontre le fil de platine, et de là se dirige sur une lentille achromatique L, à long foyer, placée à une distance du fil de platine moindre que le double de la distance focale principale. L'image du fil de platine tend alors à aller se former sur l'axe de la lentille, avec des dimensions plus ou moins am-

pliffées. Mais le faisceau lumineux, après avoir traversé la lentille, rencontre un miroir plan *m*, tournant avec une grande vitesse, sur lequel il se réfléchit et va former, dans l'espace, une image du fil de platine, qui se déplace avec une vitesse angulaire double de celle du miroir[1]. Cette image est réfléchie par un miroir M concave et fixe, dont le centre de courbure coïncide avec l'axe de rotation du miroir tournant *m* et avec son centre de figure. Le faisceau réfléchi sur le miroir M revient sur lui-même, se réfléchit de nouveau sur le miroir *m*, traverse une seconde fois la lentille, et vient former une image du fil de platine qui paraît sur ce fil même tant que le miroir *m* tourne lentement.

Pour voir cette image sans masquer le faisceau qui entre par l'ouverture K, on place une glace de verre V, à faces parallèles, entre la lentille et le fil de platine, et on l'incline de manière que les rayons réfléchis viennent tomber sur un puissant oculaire P.

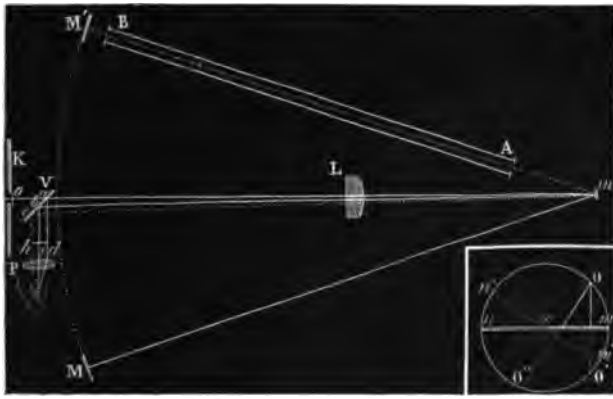


Fig. 233. Fig. 234.

Cela posé, si le miroir *m* est au repos, ou s'il tourne avec une petite vitesse, le rayon *de retour* M*m* rencontre le miroir *m* dans la même position où il était lors de la première réflexion; il reprend donc la même direction qu'il a déjà suivie, rencontre en *a* la glace V, s'y réfléchit partiellement, et vient former en *d*, à une distance *ad*, égale à *ao*, l'image que regarde l'œil avec l'oculaire P. En tournant, le miroir *m* fait reparaître cette image à chaque révolution, et si sa vitesse de rotation est uniforme, l'image reste immobile dans l'espace. Pour des vitesses qui ne dépassent pas 30 tours par seconde, les apparitions successives sont distinctes; mais, au delà de 30 tours, il y a persistance des impressions dans l'œil, et l'image apparaît absolument calme.

Enfin, si le miroir *m* tourne suffisamment vite, il a changé sensiblement de position

1. Pour le démontrer, soient *mn* (fig. 234) le miroir tournant, O un objet fixe placé au devant et formant son image en O'. Quand le miroir arrive dans la position *m'n'*, l'image se fait en O''. Or, les deux angles O'O'' et *mcm'* sont égaux, comme ayant les côtés perpendiculaires chacun à chacun; mais l'angle inscrit O'O'' n'a pour mesure que la moitié de l'arc O'O'', tandis que l'angle au centre *mcm* a pour mesure l'arc *mm'* tout entier. Donc l'arc O'O'' est double de *mm'*, ce qui démontre que la vitesse angulaire de l'image est double de celle du miroir.

dans le temps que la lumière met à faire le double parcours de m en M et de M en m; le rayon de retour, après sa réflexion sur le miroir m, prend alors la direction mb et vient former son image en i; c'est-à-dire que l'image a éprouvé une déviation totale di. Rigoureusement parlant, il y a déviation aussitôt que le miroir tourne, même lentement, mais elle n'est appréciable que lorsqu'elle acquiert une certaine grandeur, ce qui exige une vitesse de rotation assez rapide ou une distance Mm suffisamment grande; car la déviation croît nécessairement comme le temps que la lumière met à revenir sur elle-même.

Dans l'expérience de M. Foucault, la distance mM était seulement de 4 mètres, et en donnant alors au miroir m une vitesse de 600 à 800 tours par seconde, on obtient des déviations de 2 à 3 dixièmes de millimètre.

En posant $Mm = l$, $Lm = l'$, $oL = r$, et en représentant par n le nombre de tours par seconde, par δ la déviation absolue di, et par V la vitesse de la lumière, M. Foucault est arrivé à la formule

$$V = \frac{8\pi l^2 nr}{\delta(l + l')}.$$

L'appareil de M. Foucault permet d'expérimenter sur les liquides. Pour cela, un tube AB, long de 3 mètres et plein d'eau distillée, est interposé entre le miroir tournant m et un miroir concave M' identique au miroir M. Les rayons lumineux réfléchis par le miroir tournant, dans la direction mM', traversent deux fois la colonne d'eau AB, avant de revenir sur le miroir V. Or, le rayon de retour vient alors se réfléchir en e et faire son image en h; la déviation est donc plus grande pour les rayons qui ont traversé l'eau que pour ceux qui se sont propagés dans l'air seul, ce qui indique que la vitesse de la lumière est moindre dans l'eau que dans l'air.

Cette conséquence est la partie importante de l'expérience de M. Foucault. En effet, la théorie ayant fait connaître que, dans le système des ondulations, c'est dans le milieu le plus réfringent que la vitesse de la lumière est moindre, tandis que c'est le contraire qui aurait lieu dans le système de l'émission, le résultat obtenu par M. Foucault montre que c'est le système des ondulations qui doit être exclusivement adopté.

Quant au mécanisme dont se sert M. Foucault pour imprimer une grande vitesse au miroir tournant, il consiste en une petite turbine à vapeur, ayant quelque rapport avec la sirène, et rendant, comme elle, un son d'autant plus élevé que la rotation est plus rapide; c'est même d'après la hauteur du son que rend l'appareil qu'on a apprécié sa vitesse de rotation.

403. **Lois de l'intensité de la lumière.** — En prenant pour *intensité* d'une lumière la quantité reçue sur l'unité de surface d'un corps éclairé, cette intensité est soumise aux deux lois suivantes :

1° *L'intensité de la lumière sur une surface donnée, est en raison inverse du carré de la distance à la source lumineuse;*

2° *L'intensité de la lumière reçue obliquement est proportionnelle au sinus de l'angle que font les rayons lumineux avec la surface éclairée.*

Pour démontrer la première loi, soit deux écrans circulaires CD et AB (fig. 235) placés, l'un à une certaine distance d'une source lumineuse L, l'autre à une distance double; et soient s et S les surfaces de ces deux écrans. En représentant par a la quantité totale

de lumière émise par la source, suivant le cône ALB, l'intensité de la lumière sur l'écran CD, c'est-à-dire la quantité de lumière qui tombe sur l'unité de surface, est $\frac{a}{s}$; de même l'intensité sur l'écran AB est $\frac{a}{S}$. Or, à cause de la similitude des triangles ALB et CLD, le diamètre AB est double de CD; par suite, les surfaces des

Fig. 235.

cercles étant entre elles comme les carrés des diamètres, la surface S est quatre fois plus grande que s. Donc l'intensité $\frac{a}{S}$ est quatre fois plus petite que $\frac{a}{s}$, ce qu'il fallait démontrer.

On peut encore démontrer la première loi par l'expérience, au moyen de l'appareil représenté dans la figure 237. Pour cela, on compare les ombres portées sur un verre dépoli par une tige opaque éclairée d'une part par une seule bougie, de l'autre par quatre placées à une distance double de la première. On trouve ainsi que les deux ombres portées sont de même intensité, ce qui démontre la loi.

La figure 235 montre que c'est la divergence des rayons lumineux émis d'une même source, qui fait que l'intensité de la lumière est en raison inverse du carré de la distance. Pour des rayons lumineux parallèles, l'intensité reste constante, dans le vide du moins, car dans l'air et dans les autres milieux transparents, l'intensité de la lumière décroît par un effet d'absorption (461), mais beaucoup plus lentement que le carré de la distance.

Quant à la seconde loi de l'intensité, elle se démontre par le calcul. Soit en effet un faisceau de rayons parallèles DA, EB (fig. 236), tombant sur une surface AC, et formant avec elle un angle α; et soit a la quantité totale de lumière que reçoit cette sur-

face. Si l'on représente par I l'intensité de la lumière, c'est-à-dire la quantité reçue sur l'unité de surface, on a $I = \frac{a}{AC}$ [1]; mais AB étant la projection de la surface AC sur un plan perpendiculaire à la direction du faisceau, on sait, en trigonométrie, que l'on a $AB = AC \sin \alpha$; d'où $AC = \frac{AB}{\sin \alpha}$. Substituant cette valeur dans l'égalité [1], il vient $I = \frac{\sin \alpha}{AB} a$, ce qui démontre la loi; car AB et a étant constantes, I croît comme $\sin \alpha$.

Fig. 236.

La loi du sinus s'applique aussi aux rayons émis obliquement par une surface lumineuse, c'est-à-dire que les rayons sont d'autant moins intenses qu'ils sont plus inclinés sur la surface qui les émet, ce qui se rapporte à la troisième loi du calorique rayonnant [342].

404. **Photomètres.** — On nomme *photomètres* des appareils propres à comparer les intensités relatives de deux lumières. On

Fig. 237.

en a imaginé un grand nombre; mais tous laissent beaucoup à désirer sous le rapport de la précision. Nous ne décrirons ici que le photomètre de Rumford et celui de M. Wheatstone.

Photomètre de Rumford. — Le photomètre de Rumford se compose d'un écran de verre dépoli devant lequel est fixée une tige opaque *m* (fig. 237). A une certaine distance sont placées les lumières qu'on veut comparer, par exemple, une lampe et une bougie, de manière que chacune projette, sur l'écran, une ombre de la tige. Les ombres ainsi projetées sont d'abord d'inégale intensité; mais, en reculant la lampe, ou en l'approchant peu à peu, on obtient une position où l'intensité des deux ombres *a* et *b* est la même, ce qui indique que l'écran est également éclairé par

les deux lumières. Alors les intensités de ces deux lumières sont directement proportionnelles aux carrés de leurs distances aux ombres projetées; c'est-à-dire que si la lampe est, par exemple, 3 fois plus éloignée que la bougie, cela indique qu'elle éclaire 9 fois plus.

En effet, soient i et i' les intensités de la lampe et de la bougie à l'unité de distance, et d et d' leurs distances respectives aux ombres projetées. D'après la première loi de l'intensité de la lumière (403), l'intensité de la lampe à la distance d est $\frac{i}{d^2}$, et celle de la bougie, $\frac{i'}{d'^2}$ à la distance d'. Or, sur l'écran, ces deux intensités sont égales ; on a donc l'égalité $\frac{i}{d^2} = \frac{i'}{d'^2}$, d'où $\frac{i}{i'} = \frac{d^2}{d'^2}$, ce qu'il fallait démontrer.

* *Photomètre de Wheatstone.* — La pièce principale de ce photomètre est une perle d'acier P (fig. 238), montée sur le bord d'un disque de liége, porté lui-même sur un pignon *o* qui engrène intérieurement avec une roue plus grande. Celle-ci est fixée sur une

Fig. 238.

Fig. 239.

petite boîte cylindrique de cuivre qu'on tient d'une main, tandis que de l'autre on fait tourner une manivelle A, qui transmet le mouvement à un axe central et au pignon *o*. Celui-ci tournant alors suivant le contour intérieur de la grande roue et, en même temps, sur lui-même, la perle participe à ce double mouvement et décrit une courbe en forme de rosace (fig. 239).

Cela posé, soient deux lumières M et N dont on veut comparer les intensités. On place entre elles le photomètre et on le fait tourner rapidement. Les points brillants produits par la réflexion des deux lumières sur deux points opposés de la perle, donnent alors naissance à deux bandes lumineuses disposées comme le montre la figure 239. Si l'une d'elles est plus intense que l'autre, celle qui provient de la lumière M, par exemple, on approche l'instrument de l'autre lumière jusqu'à ce que les deux bandes présentent le même

éclat. Mesurant alors la distance du photomètre à chacune des deux lumières, leurs intensités sont proportionnelles aux carrés des distances.

CHAPITRE II

RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE, MIROIRS.

405. Lois de la réflexion de la lumière. — Lorsqu'un rayon lumineux rencontre une surface polie, il se réfléchit suivant les deux lois ci-après, qui sont les mêmes que pour la réflexion du calorique :

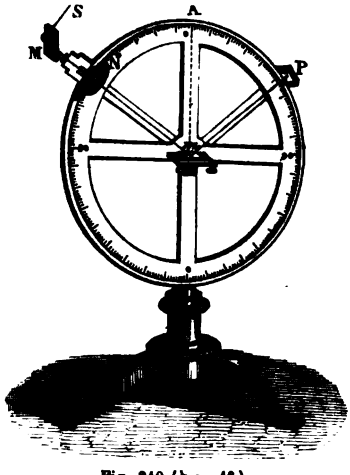


Fig. 240 (h = 48).

1° *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence ;*

2° *Le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante.*

Les mots *rayon incident*, *rayon réfléchi*, *angle d'incidence*, *angle de réflexion*, étant pris ici dans le même sens qu'au paragraphe 345, nous n'avons pas à les définir de nouveau.

1re *Démonstration.* — Les deux lois ci-dessus se démontrent, dans les cours, au moyen de l'appareil représenté dans la figure 240. C'est un cercle gradué dont le plan est vertical. Deux règles de cuivre, mobiles autour du centre, portent, l'une un écran de verre dépoli P, l'autre un écran opaque N, percé, à son centre, d'une petite ouverture. A l'extrémité de cette dernière règle est un miroir M, qui peut s'incliner plus ou moins, en restant toujours perpendiculaire au plan du cercle gradué. Enfin, au centre de ce dernier est un petit miroir plan *m*, de métal, qui est exactement horizontal.

Cela posé, pour faire l'expérience, on reçoit un faisceau de lumière solaire S sur le miroir M, qu'on incline de manière que la lumière réfléchie passe à travers l'écran N et tombe au centre du miroir *m*. Là, le faisceau lumineux éprouve une seconde réflexion et prend une direction *m*P, qu'on détermine en faisant avancer l'écran P jusqu'à ce que l'image de l'ouverture N vienne se former au centre. Lisant alors sur le limbe, les nombres de degrés compris dans les arcs AN et AP, on observe que ces nombres sont égaux, ce qui démontre que l'angle de réflexion A*m*P est égal à l'angle d'incidence A*m*M.

2me *Démonstration.* — On peut encore démontrer la loi de la

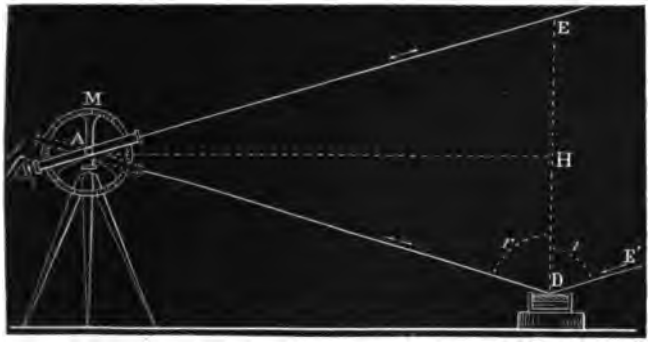


Fig. 241.

réflexion de la lumière par l'expérience suivante, qui offre plus de précision que la précédente, mais qu'il est moins facile de répéter dans un cours. On dispose verticalement un cercle gradué M (fig. 241), au centre duquel est une lunette mobile dans un plan parallèle au limbe; puis on place, à une distance convenable, un petit vase plein de mercure, destiné à présenter un miroir plan parfaitement horizontal. Cela posé, on regarde avec la lunette, suivant une direction AE, une étoile remarquable, de première ou de deuxième grandeur; puis on incline la lunette de manière à recevoir un rayon AD, venant de la même étoile, après s'être réfléchi en D sur la surface brillante du mercure. Or, on trouve ainsi que les deux angles formés par les rayons EA et DA, avec l'horizontal AH, sont égaux, d'où il est facile de conclure que l'angle d'incidence E'DE est égal à l'angle de réflexion EDA. En effet, si l'on

mène la normale DE, cette droite étant perpendiculaire à AH, le triangle AED est isocèle, et les angles ADE et AED sont égaux; mais les deux rayons lumineux AE et DE' étant parallèles à cause de la grande distance de l'étoile, les angles AED et EDE' sont égaux comme alternes-internes; donc EDE' = EDA, ce qu'on voulait démontrer.

RÉFLEXION SUR LES SURFACES PLANES.

406. **Miroirs, images.** — On nomme *miroirs* des corps à surface polie, de métal ou de verre, qui font voir par réflexion les objets qu'on leur présente. Le lieu où ces objets apparaissent est leur *image*.

Suivant leur forme, on divise les miroirs en *miroirs plans*, *concaves*, *convexes*, *sphériques*, *paraboliques*, *coniques*, etc. Les images elles-mêmes sont *virtuelles* ou *réelles*. On verra bientôt ce qui caractérise ces deux sortes d'images (408).

407. **Formation des images dans les miroirs plans.** — La détermination de la position et de la grandeur des images se réduisant toujours à la recherche des images d'une suite de points, soit d'abord un point unique A placé devant un miroir plan MN (fig. 242). Un rayon quelconque AB, parti de ce point et rencontrant le miroir, se réfléchit suivant la direction BO, en faisant l'angle de réflexion DBO égal à l'angle d'incidence ABD.

Cela posé, si l'on abaisse du point A une perpendiculaire AN sur le miroir, et si l'on prolonge le rayon OB au-dessous du miroir jusqu'à ce qu'il rencontre cette perpendiculaire en un point a, on forme deux triangles ABN et BNa, qui sont égaux, comme ayant un côté commun BN, compris entre deux angles égaux, savoir : les angles ANB et BNa, qui sont droits, et les angles ABN et NBa, qui sont égaux entre eux, comme l'étant tous les deux à l'angle OBM. De l'égalité de ces triangles il résulte que aN est égal à AN, c'est-à-dire qu'un rayon quelconque AB prend, après la réflexion, une direction telle que son prolongement au-dessous du miroir vient couper la perpendiculaire Aa, en un point a situé précisément à la même distance du miroir que le point A lui-même. Cette propriété n'étant pas particulière au rayon AB, s'applique à tout autre rayon AC parti du point A. On tire de là cette conséquence importante, que tous les rayons émis par le point A et réfléchis sur le miroir, *suivent, après leur réflexion, la même direction que s'ils*

étaient tous partis du point a. C'est ce qui fait que l'œil est trompé, et aperçoit le point A en *a*, comme s'il y était réellement. Donc, dans les miroirs plans, *l'image d'un point se fait derrière le miroir, à une distance égale à celle du point donné, et sur la perpendiculaire abaissée de ce point sur le miroir.*

Il est évident qu'on obtiendra l'image d'un objet quelconque en construisant, d'après la règle ci-dessus, l'image de chacun de ses points, ou du moins de ceux qui suffisent pour en déterminer la

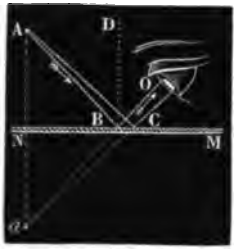


Fig. 242.

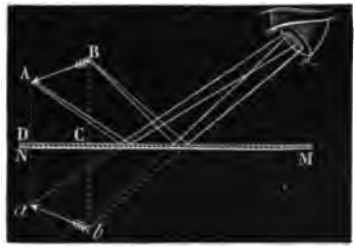


Fig. 243.

position et la forme. La figure 243 montre la construction qu'il faut faire pour obtenir l'image *ab* d'un objet quelconque AB.

De cette construction on déduit immédiatement que, dans les miroirs plans, *l'image est de même grandeur que l'objet;* car, si l'on rabat le trapèze ABCD sur le trapèze DC*ab*, on voit facilement qu'ils coïncident et que l'objet AB se confond avec son image.

Il découle encore de la construction ci-dessus que, dans les miroirs plans, *l'image est symétrique de l'objet*, et non renversée, en attachant au mot symétrique le même sens qu'en géométrie, où l'on dit que deux points sont symétriques par rapport à un plan lorsqu'ils sont situés sur une même perpendiculaire à ce plan et à une distance égale, l'un d'un côté du plan, l'autre de l'autre côté, conditions auxquelles satisfont successivement tous les points de l'objet AB et de son image dans la figure 243.

408. Images virtuelles et images réelles. — Il y a à distinguer deux cas relativement à la direction des rayons réfléchis par les miroirs, selon qu'après la réflexion ces rayons sont divergents ou convergents. Dans le premier cas, les rayons réfléchis ne se rencontrent pas; mais si on les conçoit prolongés de l'autre côté du miroir, leurs prolongements concourent en un même point, ainsi que le montrent les figures 242 et 243. L'œil étant affecté alors comme

si les rayons étaient partis de ce point, y voit une image. Or, celle-ci n'existe pas réellement, puisque les rayons lumineux ne passent pas de l'autre côté du miroir; elle n'est donc qu'une illusion de l'œil : c'est pourquoi on lui donne le nom d'*image virtuelle*, c'est-à-dire qui tend à se produire, mais qui en réalité ne se produit pas. Telles sont toujours les images données par les miroirs plans.

Dans le second cas, où les rayons réfléchis sont convergents, comme on en verra bientôt un exemple dans les miroirs concaves, ces rayons vont concourir vers un point situé en avant du miroir et du même côté que l'objet. Là, ils forment une image à laquelle on donne le nom d'*image réelle*, pour exprimer qu'elle existe réellement, car elle peut être reçue sur un écran et agir chimiquement sur certaines substances. En résumé, on peut donc dire que ***les images réelles sont celles qui sont formées par les rayons réfléchis eux-mêmes, et les images virtuelles, celles qui sont formées par leurs prolongements.***

409. **Images multiples dans les miroirs de verre.** — Les miroirs métalliques, qui n'ont qu'une seule surface réfléchissante, ne produisent qu'une seule image; mais il n'en est plus ainsi des miroirs de verre. Ces miroirs donnent naissance à plusieurs images qu'on observe facilement lorsqu'on regarde obliquement, dans une glace, l'image d'une bougie. On voit une première image peu intense, puis une deuxième très-apparente, et, derrière celle-ci, plusieurs autres dont l'intensité décroît successivement jusqu'à devenir nulle.

Fig. 244.

Ce phénomène s'explique par les deux surfaces réfléchissantes que présentent les miroirs de verre. Lorsque les rayons lumineux rencontrent la première surface, une partie est réfléchie et donne du point A une première image *a* (fig. 244), formée par le prolongement des rayons *b*E réfléchis par cette surface; l'autre partie pénètre dans le verre, se réfléchit en *c* sur la couche de tain qui recouvre la face postérieure du miroir, et revient à l'œil suivant le rayon *d*H, en donnant l'image *a'*. Celle-ci, distante de la première du double de l'épaisseur du miroir, est plus intense qu'elle, la couche métallique, qui recouvre la seconde face du miroir, réfléchissant mieux que le verre. Quant aux autres images, elles sont de plus en plus faibles, parce que les rayons auxquels elles sont dues

n'émergent qu'après une suite de réflexions successives sur les deux faces intérieures du miroir.

Comme cette multiplicité d'images nuirait à l'observation, dans plusieurs instruments d'optique, on emploie de préférence des miroirs métalliques.

* 410. **Images multiples sur deux miroirs plans.** — Lorsqu'un objet est placé entre deux miroirs formant entre eux un angle droit ou aigu, il se produit de cet objet des images dont le nombre augmente avec l'inclinaison des miroirs. S'ils sont d'abord perpendiculaires l'un à l'autre, on aperçoit trois images disposées comme le montre la figure 245. Les rayons OC et OD, partis du point O, donnent, après une seule réflexion, l'un l'image O', l'autre l'image O'', et le rayon OA, qui a subi deux réflexions en A et en B, donne la troisième image O'''.

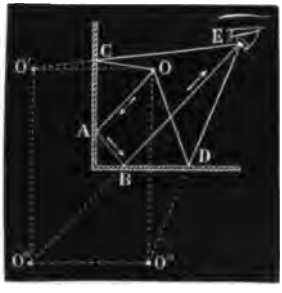


Fig. 245.

Quand l'angle des miroirs est de 60 degrés, il se forme 5 images; s'il est de 45 degrés, il s'en produit 7. Le nombre des images continue ainsi à croître à mesure que l'angle des miroirs diminue, et lorsqu'il est nul, c'est-à-dire lorsque les miroirs sont parallèles, le nombre des images est théoriquement infini. Cette multiplicité d'images provient de ce que les rayons lumineux subissent successivement d'un miroir à l'autre un nombre de réflexions croissant.

C'est sur la propriété des miroirs inclinés qu'est fondé le *kaléidoscope*, appareil formé d'un tube de carton dans lequel sont deux miroirs inclinés de 45 degrés, ou trois miroirs inclinés de 60 degrés. Des objets très-irréguliers, comme de la mousse, du clinquant, de la dentelle, étant placés à une extrémité, entre deux disque de verre, dont le plus extérieur est dépoli, lorsqu'on regarde par l'autre extrémité, on aperçoit ces objets et leurs images symétriquement disposés, ce qui donne un ensemble très-varié et souvent très-agréable.

411. **Réflexion irrégulière.** — La réflexion qui s'opère à la surface des corps polis, suivant les deux lois énoncées précédemment (405), se désigne sous le nom de *réflexion régulière* ou de *réflexion spéculaire;* mais la quantité de lumière ainsi réfléchie est loin de représenter toute la lumière incidente. Celle-ci, lorsque le corps

réfléchissant est opaque, se partage réellement en trois parties : l'une qui est réfléchie régulièrement, l'autre *irrégulièrement*, c'est-à-dire dans toutes les directions, et la troisième qui est éteinte, absorbée par le corps réfléchissant, à la manière du calorique qui devient latent dans les changements d'état. Si le corps qui reçoit les rayons incidents est transparent, il y a de plus une quatrième portion de lumière qui est transmise au travers.

La lumière réfléchie irrégulièrement se désigne sous le nom de *lumière diffuse;* c'est elle qui nous fait voir les corps. En effet, la lumière réfléchie régulièrement ne donne pas l'image du corps qui la réfléchit, mais bien celle du corps qui l'émet. Par exemple, si l'on reçoit dans une chambre obscure un faisceau de lumière solaire sur un miroir bien poli, plus celui-ci réfléchit régulièrement la lumière, moins il est visible des diverses parties de l'enceinte. L'œil qui reçoit alors le faisceau réfléchi ne voit pas le miroir, mais seulement l'image du soleil. Qu'on affaiblisse le pouvoir réflecteur du miroir en projetant dessus une poussière légère, la quantité de lumière diffuse augmente, l'image solaire s'affaiblit, et le miroir devient visible de toutes les parties de l'enceinte.

412. **Intensité de la lumière réfléchie.** — Pour des corps de même substance, l'intensité de la lumière réfléchie régulièrement augmente avec le degré de poli et avec l'angle que les rayons incidents font avec la normale à la surface réfléchissante. Par exemple, si l'on regarde très-obliquement une feuille de papier blanc, placée devant une bougie, on aperçoit, par réflexion, une image de la flamme; ce qui n'a plus lieu quand l'œil reçoit des rayons moins obliques.

Pour des corps de nature différente, polis avec le même soin, l'angle d'incidence étant le même, l'intensité varie avec la substance; elle varie encore avec le milieu dans lequel est plongé le corps réfléchissant. Par exemple, le verre poli, plongé dans l'eau, perd une grande partie de son pouvoir réfléchissant.

RÉFLEXION SUR LES SURFACES COURBES.

413. **Miroirs sphériques.** — On a déjà vu (406) qu'on distingue plusieurs sortes de miroirs courbes; ceux qu'on utilise le plus fréquemment sont les miroirs sphériques et les miroirs paraboliques.

On appelle *miroirs sphériques* ceux dont la courbure est celle d'une sphère; on peut supposer leur surface engendrée par la révo-

lution d'un arc MN (fig. 246), tournant autour du rayon CA qui joint le milieu de l'arc à son centre. Suivant que la réflexion s'opère sur la face interne ou externe du miroir, celui-ci est dit *concave* ou *convexe*. Le centre C de la sphère creuse dont le miroir fait partie est dit *le centre de courbure* ou *le centre géométrique*; le point A est le *centre de figure*. La droite indéfinie AL, menée par les centres A et C, est l'*axe principal* du miroir; toute droite qui passe par le centre C seulement, sans passer par le point A, est un axe *secondaire*. L'angle MCN, formé en joignant le centre aux bords du miroir, en est l'*ouverture*. Enfin, on nomme *section principale* ou *section méridienne* d'un miroir celle qu'on obtient en le coupant par un plan qui passe par l'axe principal. Dans tout ce que nous avons à dire sur les miroirs, il ne sera question que de lignes situées dans une même section principale.

La théorie de la réflexion de la lumière sur les miroirs courbes se déduit très-simplement des lois de la réflexion sur les miroirs plans, en considérant la surface des premiers comme formée d'une infinité de surfaces planes extrêmement petites qui en sont les *éléments*. La *normale* a la surface courbe, en un point donné, est alors la perpendiculaire à l'élément correspondant, ou, ce qui est la même chose, au plan tangent qui le contient. Or, on démontre, en géométrie, que, dans les sphères, toutes les normales passent par le centre de courbure, ce qui permet de mener facilement la normale en un point quelconque d'un miroir sphérique.

414. Foyers des miroirs sphériques concaves. — Dans les miroirs courbes, on nomme *foyers* des points où vont concourir les rayons réfléchis, ou leurs prolongements; de là deux sortes de foyers : les foyers réels et les foyers virtuels.

Foyers réels. — Considérons d'abord le cas où les rayons lumineux sont parallèles à l'axe principal, ce qui suppose le corps éclairant placé à une distance infinie, et soit GD un tel rayon (fig. 246). D'après l'hypothèse admise ci-dessus, que les miroirs courbes sont formés d'une suite d'éléments plans infiniment petits, ce rayon se réfléchit, sur l'élément correspondant au point D, selon les lois de la réflexion sur les miroirs plans (405); c'est-à-dire que CD étant la normale au point d'incidence D, l'angle de réflexion CDF est égal à l'angle d'incidence GDC et dans la même section méridienne. De là, il est facile de conclure que le point F, où le rayon réfléchi vient rencontrer l'axe principal, divise très-approximativement le rayon de courbure AC en deux parties égales. En effet, dans le triangle DFC, les côtés DF et CF sont

égaux, comme opposés à des angles égaux, car les angles DCF et FDC sont tous deux égaux à l'angle CDG, le premier comme alterne-interne, le second d'après les lois de la réflexion. D'ailleurs, FD approche d'autant plus d'égaler FA que l'arc AD est plus petit. On peut donc, lorsque cet arc n'est que d'un petit nombre de degrés, regarder les droites AF et FC comme sensiblement égales, et le point F comme le milieu de AC. Tant que l'ouverture MCN du miroir ne dépasse pas 8 à 10 degrés, tout autre rayon HB, parallèle à l'axe, vient ainsi, après la réflexion, passer très-approxi-

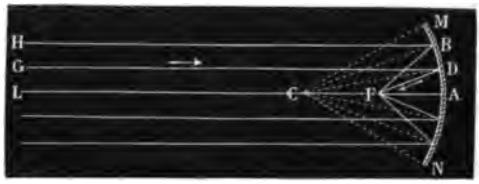


Fig. 246.

mativement par le point F. On voit donc que lorsqu'un faisceau de rayons parallèles à l'axe tombe sur un miroir concave, tous ces rayons, après la réflexion, vont sensiblement concourir en un même point situé à égale distance du centre de courbure et du miroir. Ce point remarquable est le *foyer principal* du miroir, et la distance FA est la *distance focale principale.*

Tous les rayons parallèles à l'axe allant concourir sensiblement en un même point F, il importe de remarquer que réciproquement, si l'on place en F un objet lumineux, les rayons émis par cet objet prennent, après la réflexion, des directions DG, BH..., parallèles à l'axe principal; en effet, les angles de réflexion sont alors changés en angles d'incidence, et ceux d'incidence en angles de réflexion, mais ces angles restent toujours égaux.

Soit maintenant le cas où les rayons lumineux, qui tombent sur le miroir, sont émis d'un point L (fig. 247) situé sur l'axe principal, à une distance telle que les rayons incidents ne soient plus parallèles, mais divergents. Le rayon incident LK, faisant alors avec la normale CK un angle d'incidence LKC, plus petit que l'angle SKC que fait avec la même normale le rayon SK parallèle à l'axe, l'angle de réflexion correspondant au rayon LK devra aussi être plus petit que l'angle CKF correspondant au rayon SK. Le rayon LK devra donc, après la réflexion, rencontrer l'axe en un point *l* situé entre le centre C et le foyer principal F. Tant que

l'ouverture du miroir ne dépasse pas un petit nombre de degrés, tous les rayons émis du point L viennent, après la réflexion, concourir sensiblement au même point *l*. Ce point est appelé *foyer conjugué*, pour indiquer la liaison qui existe entre les points L et *l*, liaison telle qu'ils sont réciproques l'un de l'autre; c'est-à-dire que si le point lumineux était transporté en *l*, son foyer conjugué le serait en L, *l*K devenant le rayon incident, et KL le rayon réfléchi.

A l'inspection de la figure 247, on reconnaît facilement que lors-

Fig. 247.

que l'objet L s'approche ou s'éloigne du centre C, son foyer conjugué s'en approche ou s'en éloigne avec lui; car les angles d'incidence et de réflexion croissent ou décroissent ensemble.

Si l'objet L vient à coïncider avec le centre C, l'angle d'incidence est nul, et comme il en doit être de même de l'angle de réflexion, le rayon réfléchi revient sur lui-même, et le foyer coïncide avec l'objet. Lorsque l'objet lumineux passe au delà du centre C, entre ce point et le foyer principal, le foyer conjugué à son tour passe de l'autre côté du centre, et il s'en éloigne à mesure que le point lumineux s'approche du foyer principal. Si le point lumineux coïncide avec le foyer principal, les rayons réfléchis étant parallèles à l'axe, ils ne se rencontrent plus, et, par conséquent, il n'y a pas de foyer.

Foyers virtuels. — Soit enfin le cas où l'objet est placé en L (fig. 248), entre le foyer principal et le miroir. Un rayon quelconque LM, émis du point L, fait alors, avec la normale CM, un angle d'incidence LMC plus grand que FMC; l'angle de réflexion doit donc être plus grand que l'angle CMS. Il suit de là que le rayon réfléchi ME est divergent par rapport à l'axe AK. La même chose ayant lieu pour tous les rayons émis du point L, ces rayons ne se rencontrent pas, et, par conséquent, ne forment pas de foyer conjugué; mais si on les conçoit prolongés de l'autre côté du miroir,

leurs prolongements vont sensiblement concourir en un même point *l* situé sur l'axe ; en sorte que l'œil qui les reçoit éprouve la même impression que si ces rayons étaient émis du point *l*. Il se produit donc, en ce point, un *foyer virtuel* tout à fait analogue à celui que présentent les miroirs plans (408).

Il est à remarquer, dans les différents cas qu'on vient de considérer, que la position du foyer principal est constante, tandis que celles du foyer conjugué et du foyer virtuel sont variables. Enfin, le foyer principal et le foyer conjugué sont toujours placés du même côté que l'objet par rapport au miroir, tandis que le foyer virtuel est toujours situé de l'autre côté du miroir.

Jusqu'ici on a supposé le point lumineux placé sur l'axe principal même, et alors le foyer se forme sur cet axe ; dans le cas où le point lumineux est situé sur un axe secondaire LB (fig. 249), en appliquant à cet axe les mêmes raisonnements qu'à l'axe principal, on reconnaît

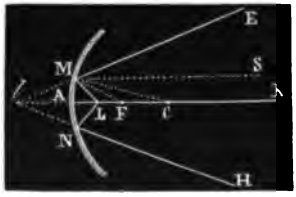


Fig. 248.

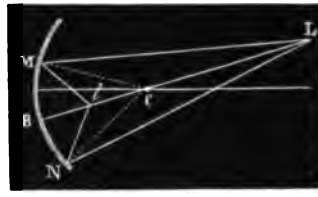


Fig. 249.

que le foyer du point L se fait en un point *l* situé sur l'axe secondaire, et que, selon la distance du point L, ce foyer peut être un foyer principal, conjugué ou virtuel. Remarquons, du reste, que les axes secondaires, de même que l'axe principal, représentent toujours un rayon lumineux incident, mais un rayons qui se confond avec la normale, et, par conséquent, avec le rayon réfléchi.

415. Foyers dans les miroirs convexes. — Dans les miroirs convexes, il n'y a que des foyers virtuels. Soient, en effet, des rayons SI, TK... (fig. 250), parallèles à l'axe principal d'un miroir convexe. Ces rayons, après leur réflexion, prennent des directions divergentes IM, KH..., qui, prolongées, vont concourir en un point F, qui est le *foyer virtuel principal* du miroir. Au moyen du triangle CKF, on démontrerait, de la même manière que dans les miroirs concaves, que le point F est sensiblement le milieu du rayon de courbure CA.

Si les rayons lumineux incidents, au lieu d'être parallèles à l'axe,

partent d'un point L situé sur l'axe à une distance finie, on reconnaît facilement que le foyer est encore virtuel, mais vient se faire en *l*, entre le foyer principal F et le miroir.

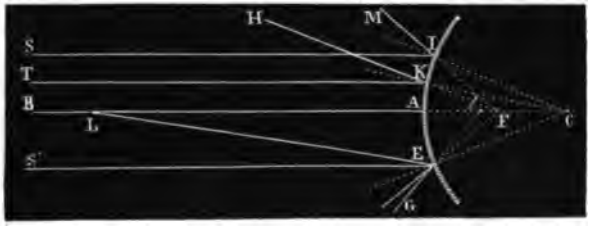


Fig. 250.

416. **Détermination du foyer principal.** — Dans les applications des miroirs concaves ou convexes, il est souvent nécessaire de connaître le rayon de courbure. Or, cette recherche revient à celle du foyer principal, car ce foyer étant placé au milieu du rayon, il suffit, pour avoir celui-ci, de doubler la distance focale.

Pour trouver le foyer, lorsque le miroir est concave, on présente celui-ci aux rayons solaires, de manière que son axe principal leur soit parallèle; puis, avec un petit écran de verre dépoli, on cherche le lieu où l'image présente le plus d'intensité; là est le foyer principal. Mesurant la distance de ce point au miroir et la doublant, on a le rayon du miroir.

Si le miroir est convexe, on le recouvre de papier, en ayant soin de réserver dans celui-ci, à égale distance du centre de figure A,

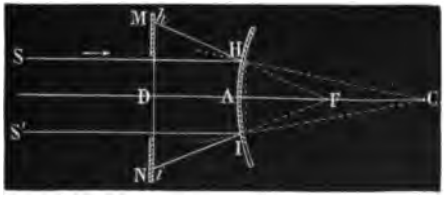


Fig. 251.

et dans un même plan méridien (fig. 251), deux petites ouvertures circulaires en H et en I, qui laissent le miroir à nu. On place ensuite, devant le miroir, un écran MN, percé à son centre d'une ouverture circulaire plus grande que la distance HI. Si l'on reçoit

alors, sur le miroir, un faisceau de rayons solaires SH, S'I, parallèles à l'axe, la lumière se réfléchit en H et en I, sur les parties où le miroir est à découvert, et va former, sur l'écran, deux images brillantes en *h* et en *i*. En reculant l'écran MN, ou en l'approchant, on trouve une position où l'intervalle *hi* est double de HI. La distance AD de l'écran au miroir représente alors la distance focale principale. En effet, les triangles FHI et F*hi* étant semblables, on a $\frac{HI}{hi} = \frac{FA}{FD}$; mais HI est la moitié de *hi*, donc FA égale aussi la moitié de FD. Par conséquent, AD égale AF; d'ailleurs, FA est la distance focale principale, puisque les rayons SH et S'I sont parallèles à l'axe; le double de AD représente donc le rayon de courbure du miroir.

417. **Formation des images dans les miroirs concaves.** — Jusqu'ici on a supposé que l'objet lumineux ou éclairé, placé devant les miroirs, était simplement un point; mais si cet objet a une certaine étendue, on peut concevoir par chacun de ces points un axe secondaire, et déterminer ainsi une suite de foyers réels ou virtuels dont l'ensemble composera l'image réelle ou virtuelle de l'objet. C'est la position et la grandeur de ces images que nous allons apprendre à déterminer dans les miroirs concaves et dans les miroirs convexes, en nous fondant sur les constructions qui ont servi à trouver les foyers (414 et 415).

Image réelle. — Soit d'abord le cas où le miroir est concave et où l'objet AB (fig. 252) est placé au delà du centre. Pour obtenir l'image ou le foyer d'un point quelconque A, on doit commencer par mener l'axe secondaire AE de ce point; puis, tirant du point A un rayon incident quelconque AD, on mène au point d'incidence la normale CD, et on construit l'angle de réflexion CD*a* égal à l'angle d'incidence ADC. Le point *a*, où le rayon réfléchi coupe l'axe secondaire AE, est le foyer conjugé du point A, parce que tout autre rayon AH, parti de ce point, vient concourir en *a*. De même, si l'on mène l'axe secondaire BI du point B, les rayons émis de ce point viennent, après la réflexion, concourir en *b*, et y former le foyer conjugué en B. Les images de tous les points de l'objet AB venant ainsi se former entre *a* et *b*, il s'ensuit que *ab* est l'image complète de AB. D'après ce qui a été dit des foyers (414), *cette image est réelle, renversée, plus petite que l'objet, et placée entre le centre de courbure et le foyer principal.* On peut voir cette image de deux manières : en plaçant l'œil sur le prolongement des rayons réfléchis, et c'est alors une image aérienne qu'on aperçoit; ou bien,

on reçoit les rayons sur un écran qui réfléchit la lumière dans toutes les directions et la renvoie vers l'œil.

Réciproquement, si l'objet lumineux ou éclairé, dont on cherche

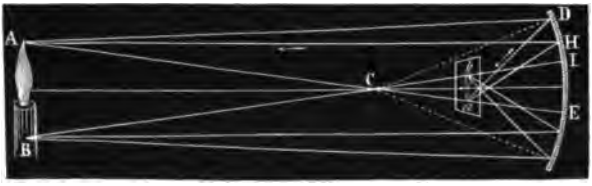


Fig. 252.

l'image, est placé en *ab*, entre le foyer principal et le centre, son image se forme en AB. Elle est encore réelle et renversée, mais plus grande que l'objet, et d'autant plus grande que l'objet *ab* est plus près du foyer.

Si l'objet est placé au foyer principal même, il ne se produit aucune image; car alors les rayons émis de chaque point forment, après la réflexion, autant de faisceaux respectivement parallèles à l'axe secondaire mené par le point d'où ils sont émis (414), et par suite ils ne peuvent former ni foyers ni images.

Lorsque l'objet AB a tous ses points hors de l'axe principal

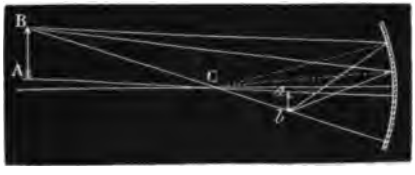


Fig. 253.

(fig. 253), on trouve facilement, en répétant la construction précédente, que l'image de cet objet se produit en *ab*.

Image virtuelle. — Soit maintenant le cas où l'objet dont on cherche l'image est placé entre le foyer principal et le miroir, et soit AB cet objet (fig. 254). Les rayons incidents AD, AK, prenant, après la réflexion, les directions DI et KH, leurs prolongements vont former en *a* une image virtuelle du point A. De même, l'image de B se forme en *b*; de sorte que l'œil voit en *ab* l'image de AB. *Cette image est virtuelle, redressée et plus grande que l'objet.*

En résumant ce qui précède, on voit que, selon la distance de l'objet, les miroirs concaves donnent lieu à deux espèces d'images,

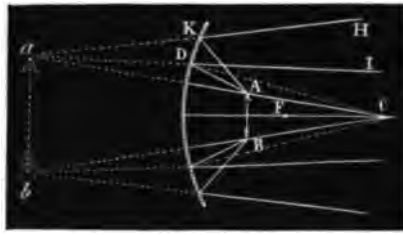


Fig. 254.

ou n'en donnent pas du tout; ce que l'on constate en se plaçant devant un miroir concave : à une certaine distance on voit sa propre image renversée et plus petite, c'est l'image réelle; plus près, l'image devient confuse, et elle disparaît lorsqu'on est au foyer; plus près encore, l'image reparaît droite et plus grande, c'est l'image virtuelle.

418. **Formation des images dans les miroirs convexes.** — Soit un objet AB (fig. 255) placé devant un miroir convexe, à une distance quelconque. Si l'on tire les axes secondaires AC et BC, il découle de ce qu'on a déjà vu (415) sur la construction des foyers,

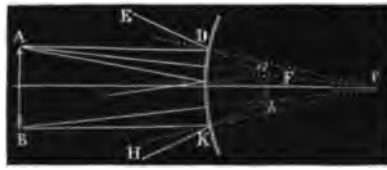


Fig. 255.

dans les miroirs convexes, que tous les rayons émis du point A sont divergents après la réflexion, et que leurs prolongements vont concourir en un point *a* qui est l'image virtuelle du point A. De même, les rayons émis du point B vont former en *b* une image virtuelle de ce point. L'œil qui reçoit les rayons divergents DE, KH..., voit donc en *ab* une image de AB. Il résulte de cette construction que, quelle que soit la position d'un objet devant un miroir convexe, *l'image est toujours virtuelle, redressée et plus petite que l'objet.*

419. **Règle générale pour la construction des images dans les**

miroirs. — Les différentes constructions exécutées ci-dessus pour le tracé des images, tant dans les miroirs concaves que dans les miroirs convexes (fig. 252, 254 et 255), peuvent se résumer dans la règle suivante :

Pour construire l'image d'un point : 1° tirez l'axe secondaire de ce point; 2° menez du point donné au miroir un rayon incident quelconque; 3° joignez le point d'incidence au centre du miroir par une droite qui représente la normale, et en même temps fait connaître l'angle d'incidence; 4° tirez du point d'incidence, de l'autre côté de la normale, une droite qui fasse avec elle un angle égal à l'angle d'incidence. Cette dernière droite, qui représente le rayon réfléchi, étant prolongée jusqu'à la rencontre de l'axe secondaire, donne, pour le lieu de l'image, le point même où elle coupe cet axe.

En appliquant la même construction à chaque point d'un objet, on aura toujours son image; laquelle sera réelle ou virtuelle, selon que ce sont les rayons réfléchis eux-mêmes qui coupent l'axe secondaire en avant du miroir, ou bien que ce sont leurs prolongements qui le coupent en arrière.

420. **Formules relatives aux miroirs sphériques.** — La relation qui existe entre la position relative d'un objet et celle de son image dans les miroirs sphériques peut se représenter par une formule très-simple. Pour cela, considérons d'abord un miroir concave, et représentons par R son rayon de courbure, par p la distance LA

Fig. 256.

de l'objet L (fig. 256) au miroir, et par p' la distance lA de l'image à ce même miroir. Dans le triangle LMl, la normale MC partageant l'angle LMl, en deux parties égales, on peut appliquer ce théorème de géométrie, que, dans tout triangle, la bissectrice d'un angle partage le côté opposé en deux segments qui sont entre eux comme les deux côtés de l'angle; c'est-à-dire que

$$\frac{Cl}{CL} = \frac{lM}{LM} \text{ d'où } Cl \times LM = CL \times lM.$$

Or, si l'arc AM ne dépasse pas 5 à 6 degrés, les lignes ML et Ml sont très-sensiblement égales à AL et Al, c'est-à-dire à p et p'. D'ailleurs,

$$Cl = CA - Al = R - p', \text{ et } CL = AL - AC = p - R.$$

Substituant ces diverses quantités dans l'égalité qui précède, il vient

$$(R - p')\,p = (p - R)\,p', \text{ ou } Rp - pp' = pp' - Rp';$$

transposant et réduisant, on trouve $Rp + Rp' = 2\,pp'$ [1].

Si l'on divise tous les termes de cette égalité par $pp'R$, et qu'on supprime les facteurs communs, elle prend la forme

$$\frac{1}{p'} + \frac{1}{p} = \frac{2}{R} \text{ [2]}$$

sous laquelle on la considère ordinairement.

En résolvant l'équation [1] par rapport à p', on en tire

$$p' = \frac{pR}{2p - R} \text{ [3]};$$

formule qui fait connaître la distance de l'image au miroir, quand on connaît celle de l'objet et le rayon de courbure.

421. Discussion de la formule des miroirs. — Cherchons maintenant les différentes valeurs que prend p' suivant celles qu'on donne à p dans la formule [3].

1° Soit d'abord l'objet lumineux ou éclairé placé sur l'axe à une distance infinie, cas où les rayons incidents sont parallèles. Pour interpréter la valeur que prend alors p', il faut diviser par p les deux termes de la fraction $\frac{pR}{2p - R}$, ce qui donne $p' = \frac{R}{2 - \frac{R}{p}}$ [4].

Or, en introduisant dans cette formule la condition que p est infini, la fraction $\frac{R}{p}$ est nulle, et on a $p' = \frac{R}{2}$; c'est-à-dire que l'image se fait au foyer principal, ce qui devait être, puisque les rayons incidents forment alors un faisceau parallèle à l'axe.

2° Si l'objet s'approche du miroir, p décroît et le dénominateur de la formule [4] diminuant, la valeur de p' augmente; par conséquent, l'image s'approche du centre en même temps que l'objet, mais elle est toujours comprise entre le foyer principal et le centre, car tant que p est $> R$, on a

$$\frac{R}{2 - \frac{R}{p}} > \frac{R}{2} \text{ et } < R.$$

3° Si l'objet coïncide avec le centre, ce qui s'exprime en faisant $p = R$, il vient $p' = R$, c'est-à-dire que l'image coïncide avec l'objet.

4° L'objet lumineux passant entre le centre et le foyer principal, on a $p < R$, et on conclut de la formule [4] que p' est $> R$; c'est-à-dire que l'image se fait alors de l'autre côté du centre. Lorsque l'objet est arrivé au foyer principal, on a $p = \frac{R}{2}$, ce qui donne $p' = \frac{R}{0} = \infty$; c'est-à-dire que l'image se fait à l'infini. En effet, les rayons réfléchis sont alors parallèles à l'axe.

5° Enfin, si l'objet passe entre le foyer principal et le miroir, on a $p < \frac{R}{2}$; le dénominateur de la formule [4] étant alors négatif, il en est de même de p'; ce qui indique que la distance p' de l'image au miroir doit se compter sur l'axe en sens contraire de p. En effet l'image est alors virtuelle et située de l'autre côté du miroir (414).

En introduisant dans la formule [2] la condition que p' est négatif, cette formule

devient $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{2}{R}$; sous cette forme, elle comprend le cas des images virtuelles dans les miroirs concaves.

Dans le cas des miroirs convexes, l'image étant toujours virtuelle (418), p' et R sont de même signe, puisque l'image et le centre sont d'un même côté du miroir, tandis que l'objet étant de l'autre côté, p est de signe contraire; en introduisant cette condition dans la formule [2], on trouve $\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{2}{R}$ [5], pour la formule relative aux miroirs convexes. Du reste, on pourrait la trouver directement par les mêmes considérations géométriques qui ont fait trouver la formule [2] des miroirs concaves.

Il importe d'observer que les différentes formules qui précèdent ne sont pas rigoureuses, puisqu'elles s'appuient sur des hypothèses qui ne le sont pas elles-mêmes, savoir que les droites LM et *l*M (fig. 256) sont égales à LA et à *l*A, ce qui n'est vrai qu'à la limite, c'est-à-dire quand l'angle MCA est nul; mais ces formules approchent d'autant plus d'être exactes que l'ouverture du miroir est plus petite.

422. Calcul de la grandeur des images. — A l'aide des formules ci-dessus, on peut facilement calculer la grandeur d'une image, quand on connaît la dis-

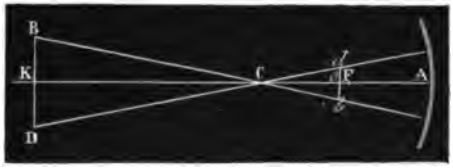


Fig. 257.

tance de l'objet, sa grandeur et le rayon du miroir. En effet, si l'on représente l'objet par BD (fig. 257), son image par *bd*, et si l'on suppose connue la distance KA et le rayon AC, on calcule A*o* au moyen de la formule [3] du paragraphe 420. A*o* une fois connu, on en déduit *o*C. Or, les deux triangles BCD et *d*C*b* étant semblables, on a entre leurs bases et leurs hauteurs la proportion $\frac{BD}{bd} = \frac{CK}{Co}$, d'où l'on tire la grandeur *bd* de l'image.

*** 423. Aberration de sphéricité, caustiques.** — Dans la théorie qui

Fig. 258.

vient d'être donnée des foyers et des images dans les miroirs sphériques, on a déjà remarqué que les rayons réfléchis ne viennent sensiblement concourir en un point unique qu'autant que l'ouverture du miroir ne dépasse pas 8 à 10 degrés (414). Pour une ouverture plus grande, les rayons réfléchis près des bords vont rencontrer l'axe plus près du miroir que ceux qui se sont réfléchis à une petite distance du centre de

courbure. De là résulte, dans les images, un défaut de netteté qu'on désigne sous le nom d'*aberration de sphéricité* par réflexion, pour la distinguer de l'aberration de sphéricité par réfraction que présentent les lentilles (448).

Les rayons réfléchis se coupant successivement deux à deux, comme on le voit au-dessus de l'axe FL (fig. 258), leurs points d'intersection forment, dans l'espace, une surface brillante qu'on nomme *caustique par réflexion*. La courbe FM représente une des branches de la section méridienne de cette surface.

424. Applications des miroirs. — On connaît les applications des miroirs plans dans l'économie domestique. Ces miroirs sont aussi d'un fréquent usage, dans plusieurs appareils de physique, pour donner à la lumière une direction déterminée. Si c'est la lumière solaire qu'on veut ainsi diriger, on ne peut conserver aux rayons réfléchis une direction constante qu'autant que le miroir est mobile. Il faut, en effet, donner à celui-ci un mouvement qui compense le changement de direction que prennent sans cesse les rayons incidents, en vertu du mouvement diurne apparent du soleil. Ce résultat s'obtient par un mouvement d'horlogerie qui fait varier l'inclinaison du miroir au moyen d'une tige à laquelle celui-ci est fixé. L'appareil ainsi construit a reçu le nom d'*héliostat*. La réflexion de la lumière a encore été utilisée pour mesurer les angles des cristaux avec une grande précision, au moyen d'instruments connus sous le nom de *goniomètres* à réflexion.

Les miroirs sphériques concaves ont aussi reçu de nombreuses applications. On s'en sert comme miroirs grossissants, tels sont les miroirs à barbe. On a déjà vu l'usage qu'on peut en tirer comme miroirs ardents (347); ils sont encore employés dans les télescopes. Enfin, ces miroirs peuvent aussi servir comme réflecteurs pour porter la lumière à de grandes distances, en plaçant une source lumineuse à leur foyer principal; mais, pour cet usage, on doit préférer les miroirs paraboliques.

425. Miroirs paraboliques. — Les *miroirs paraboliques* sont des miroirs concaves dont la surface est celle engendrée par la révolution d'un arc de parabole AM, tournant autour de son axe AX (fig. 259).

On a vu ci-dessus (423) que, dans les miroirs sphériques, les rayons parallèles à l'axe ne viennent qu'approximativement concourir au foyer principal; il en résulte réciproquement qu'une source de lumière étant placée au foyer principal de ces miroirs, les rayons réfléchis ne forment pas rigoureusement un faisceau parallèle à l'axe. Or, ce défaut ne se rencontre pas dans les miroirs paraboliques, qui sont plus difficiles à construire que les miroirs

sphériques, mais dont l'usage est bien préférable pour réflecteurs. En effet, c'est une propriété connue de la parabole qu'en un point quelconque M de cette courbe, le rayon vecteur FM et la droite ML, parallèle à l'axe, font avec la tangente TT' des angles égaux. Par suite, dans ces sortes de miroirs, tous les rayons parallèles à l'axe vont rigoureusement concourir, après la réflexion, au foyer F du miroir, et réciproquement une source de lumière étant placée en ce foyer, les rayons lumineux qui tombent sur le miroir se réfléchissent en donnant naissance à un faisceau rigoureusement parallèle à l'axe. Il suit de là que la lumière ainsi réfléchie tend à conserver la même intensité à une grande distance, car on a vu (403) que c'est surtout la divergence des rayons lumineux qui affaiblit l'intensité de la lumière.

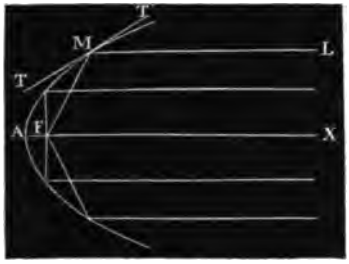


Fig. 259.

C'est d'après la propriété ci-dessus des miroirs paraboliques que les lampes qu'on place sur les voitures publiques, ainsi que celles qui sont à l'arrière et à l'avant des convois des chemins de fer, sont munies de réflecteurs paraboliques. Ces sortes de réflecteurs ont été aussi longtemps en usage pour les phares, mais nous verrons bientôt qu'on emploie de préférence aujourd'hui des verres lenticulaires.

Fig. 260.

En coupant par un plan passant par le foyer et perpendiculaire à l'axe, deux miroirs paraboliques égaux, et les réunissant suivant leurs intersections, comme le montre la figure 260, en sorte que leurs deux foyers coïncident, on obtient un système de réflecteurs avec lequel une seule lampe éclaire à la fois dans deux directions opposées. C'est ce système qu'on applique aux escaliers, afin de les éclairer en même temps dans toute leur étendue.

CHAPITRE III

RÉFRACTION SIMPLE, LENTILLES.

426. Phénomène de la réfraction. — La *réfraction* est une déviation qu'éprouvent les rayons lumineux lorsqu'ils passent obliquement d'un milieu dans un autre; par exemple, de l'air dans l'eau ou dans tout autre milieu. Nous disons *obliquement*, car si le rayon lumineux est perpendiculaire à la surface qui sépare les deux milieux, il n'est pas dévié et continue à se propager en ligne droite.

Le *rayon incident* étant représenté par SO (fig. 261), on nomme *rayon réfracté* la direction OH que prend la lumière dans le second milieu, et les angles SOA et HOB que forment ces rayons avec la droite AB, normale à la surface qui sépare les deux milieux, sont nommés l'un, *angle d'incidence*, et l'autre, *angle de réfraction*. Suivant que le rayon réfracté s'approche ou s'écarte de la normale, on dit que le second milieu est plus ou moins *réfringent* que le premier.

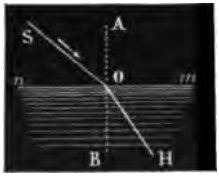


Fig. 261.

Le calcul montre que le sens de la réfraction dépend de la vitesse relative de la lumière dans les deux milieux. Dans le système des ondulations, le milieu le plus réfringent est celui dans lequel la vitesse de propagation est moindre.

La lumière incidente, qui se présente pour passer d'un milieu dans un autre, ne pénètre jamais complétement dans celui-ci : une partie se réfléchit à la surface qui sépare les deux milieux, et l'autre partie pénètre seule dans le second.

Dans les milieux non cristallisés, comme l'air, les liquides, le verre ordinaire, le rayon lumineux, simple à l'incidence, reste encore simple après la réfraction; mais dans certains corps cristallisés, comme le spath d'Islande, le sulfate de chaux cristallisé ou gypse, le rayon incident donne naissance à deux rayons réfractés. Le premier phénomène constitue la *réfraction simple*; le second se désigne sous le nom de *double réfraction*. Il ne sera question ici que de la réfraction simple; la théorie de la double réfraction sera donnée plus tard (505).

427. Lois de la réfraction simple. — Lorsqu'un rayon lumineux

se réfracte en passant d'un milieu dans un autre doué d'un pouvoir réfringent différent, on observe les deux lois suivantes :

1° *Quelle que soit l'obliquité du rayon incident, le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction sont dans un rapport constant pour deux mêmes milieux, mais variable si les milieux changent ;*

2° *Le rayon incident et le rayon réfracté sont dans un même plan perpendiculaire à la surface qui sépare les deux milieux.*

Ces lois sont connues sous le nom de *lois de Descartes*, qui, le premier, les a formulées. Pour les démontrer, on emploie le même appareil que pour les lois de la réflexion (405). A cet effet, on remplace le miroir plan, placé au centre du cercle gradué, par un vase hémicylindrique de verre, rempli d'eau, de manière que la surface du liquide soit exactement à la hauteur du centre du cercle (fig. 262). Si l'on incline alors le miroir M de manière à diriger vers le centre un rayon réfléchi MO, celui-ci se réfracte à son entrée dans l'eau; mais il en sort sans réfraction, parce qu'à sa sortie sa direction est normale à la paroi courbe du vase B. Pour suivre la marche du rayon réfracté PO. on le reçoit sur un écran P, qu'on fait mouvoir jusqu'à ce que l'image de l'ouverture pratiquée dans l'écran N vienne se former à son centre. Enfin, dans toutes les positions des écrans N et P, les sinus de l'angle d'incidence et de l'angle de réfraction sont représentés et mesurés par deux règles I et R, mobiles autour d'un axe, divisées en millimètres et équilibrées de manière à rester constamment horizontales, c'est-à-dire perpendiculaires au diamètre AD.

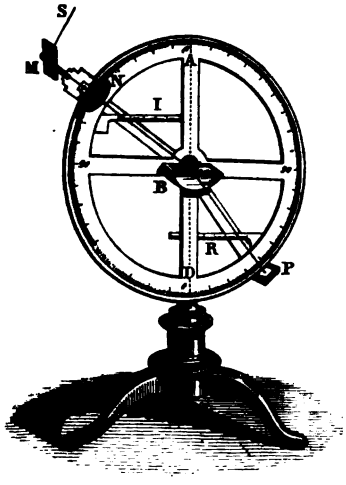


Fig. 262. (h = 48).

Cela posé, en lisant, sur les règles I et R, les longueurs des sinus des angles MOA et DOP, on trouve des nombres qui varient avec la position des écrans, mais dont le rapport est constant; c'est-à-dire

que le sinus d'incidence devenant deux, trois fois plus grand, il en est de même du sinus de réfraction, ce qui démontre la première loi. Quant à la seconde, elle se trouve démontrée par la disposition même de l'appareil, puisque le plan du limbe gradué est perpendiculaire à la surface du liquide dans le vase hémicylindrique.

428. Indices de réfraction. — Le rapport entre les sinus des angles d'incidence et de réfraction se nomme *indice de réfraction*. Il varie suivant les milieux; par exemple, de l'air à l'eau il est $\frac{4}{3}$, et de l'air au verre $\frac{3}{2}$.

Si l'on considère les milieux dans un ordre inverse, c'est-à-dire si la lumière se propage de l'eau dans l'air, ou du verre dans l'air, on trouve qu'elle suit *la même route*, mais en sens contraire, PO devenant le rayon incident, et OM le rayon réfracté. Par conséquent, le rapport qui représente l'indice de réfraction est lui-même renversé; il est alors de l'eau à l'air $\frac{3}{4}$, et du verre à l'air $\frac{2}{3}$.

429. Effets produits par la réfraction. — Par l'effet de la réfraction, les corps plongés dans un milieu plus réfringent que l'air paraissent rapprochés de la surface du liquide; ils en paraî-

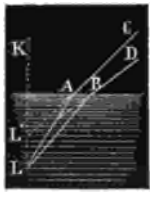


Fig. 263.

Fig. 264.

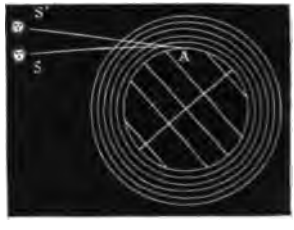


Fig. 265.

traient, au contraire, écartés, s'ils étaient dans un milieu moins réfringent. Soit, par exemple, un objet L plongé dans une masse d'eau (fig. 263). En passant de ce liquide dans l'air, les rayons LA, LB..., s'écartent de la normale au point d'incidence et prennent des directions AC, BD..., dont les prolongements concourent sensiblement en un point L' situé sur la perpendiculaire LK. L'œil qui reçoit ces rayons voit donc l'objet L en L'. Plus les rayons LA, LB..., sont obliques, plus l'objet paraît relevé.

C'est par le même effet qu'un bâton plongé obliquement dans l'eau semble brisé (fig. 264), la partie immergée paraissant relevée.

C'est encore par un effet de réfraction que les astres nous paraissent relevés au-dessus de l'horizon. En effet, les couches de

l'atmosphère augmentant de densité en se rapprochant du sol, et pour un même gaz la puissance réfractive croissant avec la densité (439), il en résulte qu'en entrant dans l'atmosphère et en s'y propageant, les rayons lumineux se brisent, comme le montre la figure 265, en décrivant une courbe qui arrive jusqu'à l'œil; c'est donc suivant la tangente à cette courbe que nous voyons l'astre en S', au lieu de le voir en S. Dans nos climats, la réfraction atmosphérique ne relève pas les astres de plus d'un demi-degré.

430. **Angle limite, réflexion totale.** — Quand un rayon lumineux passe d'un milieu dans un autre moins réfringent, comme de l'eau dans l'air, on a vu (428) que l'angle de réfraction est alors plus grand que l'angle d'incidence. Il suit de là que quand la lumière se propage dans une masse d'eau, de S en O (fig. 266), il y a toujours une valeur de l'angle d'incidence SOB pour laquelle l'angle de réfraction AOR est droit, ou, ce qui est la même chose, pour laquelle le rayon réfracté OR sort parallèle à la surface de l'eau.

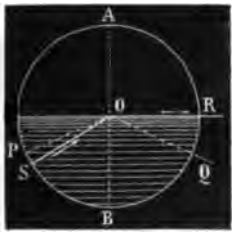


Fig. 266.

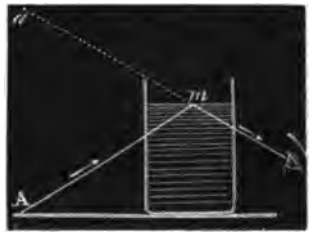


Fig. 267.

Cet angle SOB se nomme *angle limite*, parce que, pour tout angle d'incidence plus grand, tel que POB, le rayon incident PO ne peut donner naissance à aucun rayon réfracté. En effet, l'angle AOR augmentant avec l'angle SOB, le rayon OR se trouve porté en OQ, c'est-à-dire qu'il n'y a plus réfraction au point O, mais une réflexion intérieure qu'on désigne sous le nom de *réflexion totale*, parce que la lumière incidente est alors réfléchie en totalité. De l'eau à l'air, l'angle limite est de 48° 35'; du verre à l'air, il est de 41° 48'.

On constate la réflexion intérieure par l'expérience suivante : devant un vase de verre rempli d'eau (fig. 267), on place un objet A; puis, regardant de l'autre côté du vase la surface du liquide de

bas en haut, comme le montre la figure, on aperçoit en *a*, au-dessus du liquide, l'image de l'objet A, laquelle est formée par les rayons réfléchis en *m*.

431. **Mirage.** — Le *mirage* est une illusion d'optique qui fait apercevoir, au-dessous du sol ou dans l'atmosphère, l'image renversée des objets éloignés. Ce phénomène s'observe fréquemment dans les pays chauds, et particulièrement dans les plaines sablonneuses de l'Égypte. Là, le sol présente souvent l'aspect d'un lac tranquille, sur lequel se réfléchissent les arbres et les villages environnants. Ce phénomène a été observé dès la plus haute antiquité; mais c'est Monge, le premier, qui en a donné l'explication, lorsqu'il faisait partie de l'expédition d'Égypte.

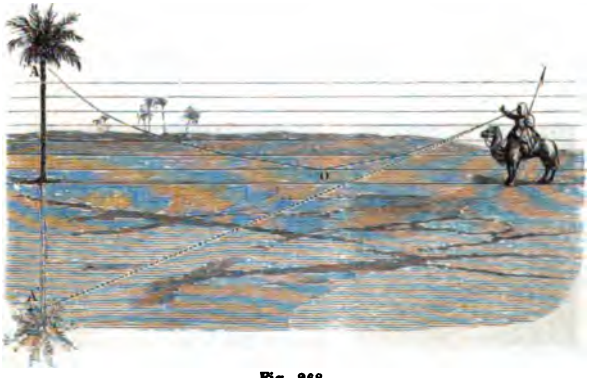


Fig. 268.

Le mirage est un phénomène de réfraction qui résulte de l'inégale densité des couches de l'atmosphère lorsqu'elles sont dilatées par leur contact avec le sol fortement échauffé. Les couches les moins denses étant alors les plus inférieures, un rayon lumineux qui se dirige d'un objet élevé A vers le sol, traverse des couches de moins en moins réfringentes; car on verra bientôt (439) qu'un même gaz est d'autant moins réfringent qu'il est moins dense. Il résulte de là que l'angle d'incidence croît d'une couche à la suivante, et finit par atteindre l'angle limite au delà duquel, à la réfraction, succède la réflexion intérieure (430). Le rayon se relève alors comme le montre la figure 268, et subit une suite de réfractions successives en sens contraire des premières, car il passe maintenant dans des couches

de plus en plus réfringentes. Le rayon lumineux arrive donc à l'œil de l'observateur avec la même direction que s'il était parti d'un point situé au-dessous du sol, et c'est pour cela qu'il donne une image renversée de l'objet qui l'a émis, comme s'il s'était réfléchi, au point O, sur la surface d'une eau tranquille.

Quelquefois les navigateurs observent, dans l'atmosphère, l'image renversée des côtes ou des navires éloignés : c'est encore là un effet de mirage, mais qui se produit en sens contraire du premier et seulement lorsque la température de la mer est inférieure à celle de l'air, car ce sont alors les couches inférieures de l'atmosphère qui sont les plus denses à cause de leur contact avec la surface des eaux.

TRANSMISSION DE LA LUMIÈRE A TRAVERS LES MILIEUX DIAPHANES.

432. Milieux à faces parallèles. — Lorsque la lumière traverse un milieu à faces parallèles, les rayons *émergents*, c'est-à-dire ceux qui sortent, sont parallèles aux rayons incidents.

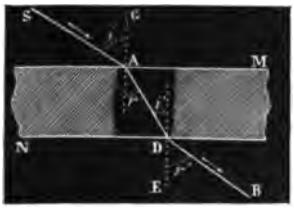


Fig. 269.

Pour le démontrer soient MN (fig. 269) une glace de verre à faces parallèles, SA un rayon incident, DB le rayon émergent, i et r les angles d'incidence et de réfraction à l'entrée du rayon, et enfin, i' et r' les mêmes angles à sa sortie. En A, la lumière éprouve une première réfraction dont l'indice est $\frac{\sin i}{\sin r}$. En D, elle se réfracte une seconde fois, et l'indice est alors $\frac{\sin i'}{\sin r'}$. Or, on a vu (423) que l'indice de réfraction du verre à l'air est le même que celui de l'air au verre renversé; on a donc

$$\frac{\sin i'}{\sin r'} = \frac{\sin r}{\sin i}.$$

Mais les deux normales AG et DE étant parallèles, les angles r et i' sont égaux comme alternes internes. Par conséquent, les numérateurs des deux rapports ci-dessus étant égaux, il en est de même des dénominateurs, d'où l'on conclut que les angles r' et i sont égaux, et, par suite, que DB est parallèle à SA.

433. Prismes. — On nomme *prisme*, en optique, tout milieu transparent compris entre deux faces planes inclinées l'une sur

l'autre. L'intersection de ces deux faces est une ligne droite qui est l'*arête* du prisme, et l'angle qu'elles comprennent est son *angle réfringent*. Toute section perpendiculaire à l'arête est dite *section principale*. Les prismes qu'on emploie pour les expériences étant ordinairement des prismes triangulaires droits, en verre, comme celui que montre la figure 270, leur section principale est un triangle (fig. 271). Dans cette section, le point A prend le nom de *sommet* du prisme, et la droite BC est dite sa *base*; expressions qui, géométriquement, ne conviennent qu'au triangle ABC, et non au prisme.

434. **Marche des rayons dans les prismes.** — Quand on connaît les lois de la réfraction, il est facile de déterminer la marche de la lumière dans les prismes. Soit, en effet, un point lumineux O (fig. 271),

Fig. 270.

Fig. 271.

contenu dans le plan de la section principale ABC d'un prisme, et soit OD un rayon incident. Ce rayon se réfracte en D, en se rapprochant de la normale, puisqu'il entre dans un milieu plus réfringent. En K, il éprouve une seconde réfraction, mais alors il s'écarte de la normale, car il passe dans l'air qui est moins réfringent que le verre. La lumière s'est donc réfractée deux fois dans le même sens, et l'œil qui reçoit le rayon émergent KH voit l'objet O en O'; c'est-à-dire que les *objets vus à travers un prisme paraissent déviés vers son sommet*. La déviation que le prisme imprime ainsi à la lumière est mesurée par l'angle OEO' que forment entre eux le rayon incident et le rayon émergent; cet angle se nomme *angle de déviation*.

On remarque, en outre, que les objets vus à travers les prismes paraissent doués des couleurs éclatantes de l'arc-en-ciel : ce phénomène sera décrit bientôt sous le nom de *dispersion* (451).

* 435. **Condition d'émergence dans les prismes.** — Les rayons lumineux qui se sont réfractés à la première face d'un prisme ne peuvent émerger à la

deuxième qu'autant que l'angle réfringent du prisme est moindre que le double de l'angle limite de la substance dont le prisme est formé.

En effet, en représentant par LI (fig. 272) le rayon incident sur la première face, par IE ce rayon réfracté, par PI et PE les normales, on sait que le rayon IE ne peut émerger à la seconde face que si l'angle d'incidence IEP est moindre que l'angle limite (430). Or, l'angle d'incidence NIL augmentant, il en est de même de l'angle EIP, tandis que IEP diminue. Par conséquent, plus la direction du rayon LI approche d'être parallèle à la face AB, plus ce rayon tend à donner un rayon émergent à la seconde face.

Soit donc le cas où LI serait parallèle à AB, l'angle r est alors égal à l'angle limite l du prisme, puisqu'il a sa valeur maximum. D'ailleurs l'angle EPK, extérieur au triangle IPE, égale $r + i'$; mais les angles EPK et A sont égaux comme ayant leurs côtés perpendiculaires; donc $A = r + i'$; donc aussi $A = l + i'$, puisque dans le cas que nous considérons $r = l$. Par conséquent, si $A = 2l$, ou est $> 2l$, on aura $i' = l$, ou $> l$; il ne saurait donc y avoir émergence sur la seconde face, mais réflexion intérieure et émergence seulement à la troisième face BC. A plus forte raison il en sera de même encore pour des rayons dont l'angle d'incidence est moindre que BIN, puisqu'on a vu ci-dessus que l'angle i' va alors en croissant. Ainsi, dans le cas où l'angle réfringent du prisme est égal à $2l$ ou plus grand, aucun rayon lumineux ne peut passer à travers les faces de l'angle réfringent.

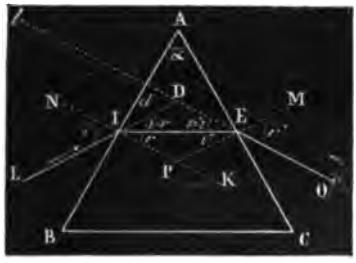


Fig. 272.

L'angle limite du verre étant de 41° 48′, le double de cet angle est plus petit que 90 degrés, d'où l'on conclut qu'on ne peut voir les objets à travers un prisme de verre dont l'angle réfringent est droit. L'angle limite de l'eau étant 48° 35′, la lumière peut encore traverser l'angle droit d'un prisme rectangle creux qui serait formé par trois glaces et rempli d'eau.

Dans le cas où l'angle A est plus petit que $2l$, il y a toujours émergence, à la seconde face, d'une partie de la lumière qui tombe sur la première, et la quantité de lumière qui passe alors dépend de l'incidence des rayons directs LI. L'angle A étant compris entre l et $2l$, une partie des rayons incidents compris dans l'angle NIB peut émerger; mais tous ceux compris dans l'angle NIA éprouvent la réflexion totale sur la face AC. Pour $A > 0$ et $< l$, tous les rayons compris dans l'angle NIB et une partie de ceux contenus dans l'angle NIA peuvent passer.

* 436. **Déviation minimum.** — Lorsqu'on reçoit un faisceau de lumière solaire à travers une ouverture A pratiquée dans le volet d'une chambre obscure (fig. 273), on remarque que le faisceau va se projeter suivant une droite AC sur un écran éloigné. Mais si l'on interpose un prisme vertical entre l'ouverture du volet et l'écran, le faisceau est dévié vers la base du prisme et vient se projeter en D, loin du point C. Si l'on tourne alors le support qui porte le prisme, de manière que l'angle d'incidence décroisse, on voit le disque lumineux D se rapprocher du point C jusqu'à une certaine position E, à partir de laquelle il revient sur lui-même, lors même que l'on continue à tourner le prisme dans le même sens. Il y a donc une déviation EBC plus petite que toutes les autres. On démontre par le calcul que cette *déviation minimum* a lieu lorsque les angles d'incidence et d'émergence sont égaux.

L'angle de déviation minimum peut se déterminer par le calcul, quand on connaît l'angle d'incidence et l'angle réfringent du prisme. En effet, lorsqu'il y a déviation minimum, l'angle d'émergence r' étant égal à l'angle d'incidence i (fig. 272), il faut que $r = i'$. Or, on a vu ci-dessus (435) que $A = r + i'$; donc $A = 2r$ [1]. Cela posé, si l'on représente par d l'angle de déviation minimum lDL, cet angle étant extérieur au triangle DIE, on trouvera facilement l'égalité

$$d = i - r + r' - i' = 2i - 2r, \text{ ou } d = 2i - A \text{ [2]},$$

laquelle fait connaître l'angle d quand les angles i et A sont donnés.

Des formules [1] et [2] on en tire une troisième qui sert à calculer l'indice de réfraction d'un prisme, quand on en connaît son angle réfringent et la déviation minimum.

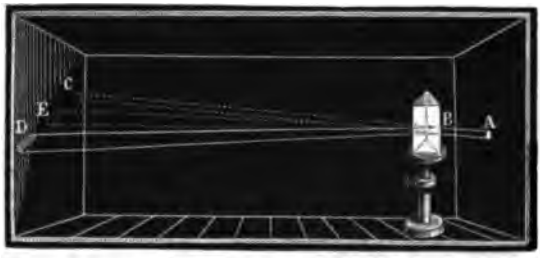


Fig. 273.

En effet, l'indice de réfraction étant le rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction, si on le représente par n, on a $n = \frac{\sin i}{\sin r}$, et en remplaçant i et r par leurs valeurs tirées des formules [1] et [2] ci-dessus, il vient

$$n = \frac{\sin\left(\frac{A + d}{2}\right)}{\sin \frac{A}{2}} \text{ [3]}.$$

* 437. **Mesure de l'indice de réfraction des solides.** — Au moyen de la formule [3] ci-dessus, on calcule facilement l'indice de réfraction quand les angles A et d sont connus.

Pour déterminer d'abord l'angle A, on taille sous la forme de prisme triangulaire la substance transparente dont on veut avoir l'indice de réfraction; puis on mesure l'angle A du prisme au moyen d'un *goniomètre* (424).

Quant à l'angle d, on le mesure de la manière suivante ; on reçoit sur le prisme un rayon LI émis par un objet éloigné (fig. 274), et on tourne le prisme de manière à obtenir la déviation minimum ED. Mesurant alors avec un cercle à lunette l'angle EDL' que fait le rayon réfracté DE avec le rayon DL' qui vient directement de l'objet, cet angle n'est autre que l'angle de déviation minimum, en admettant que l'objet est assez éloigné pour que les deux rayons LI et L'D soient sensiblement parallèles Il ne reste plus qu'à substituer les valeurs de A et de d dans la formule [3] pour en déduire la valeur de l'indice n.

Ce procédé, qui est dû à Newton, ne peut s'appliquer qu'aux corps transparents; mais Wollaston a fait connaître une autre méthode au moyen de laquelle on peut

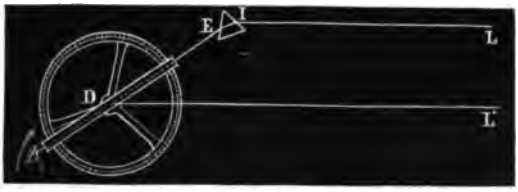


Fig. 274.

calculer l'indice de réfraction d'un corps opaque, par la détermination de son angle limite.

* 438. **Mesure de l'indice de réfraction des liquides.** — M. Biot a appliqué la méthode de Newton, c'est-à-dire celle du minimum de déviation, à la recherche de l'indice de réfraction des liquides. Pour cela, dans un prisme de verre PQ (fig. 275), on perce une cavité cylindrique O d'environ 2 centimètres de diamètre et allant de la face d'incidence à la face d'émergence. Cette cavité se ferme au moyen de deux plaques de verre à faces bien parallèles, qui s'appliquent sur les faces du prisme. Une petite ouverture B, qui se ferme avec un bouchon à l'émeri, sert à introduire le liquide. Ayant déterminé l'angle réfringent et la déviation minimum du prisme liquide compris dans la cavité O, on introduit la valeur de ces angles dans la formule [3] du paragraphe 436, ce qui donne l'indice.

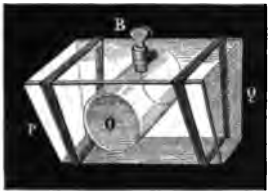


Fig. 275

* 439. **Mesure de l'indice de réfraction des gaz.** — C'est encore par la méthode de Newton que l'indice de réfraction des gaz a été déterminé par M. Biot et Arago. L'appareil dont se sont servis ces physiciens se compose d'un tube de verre AB (fig. 276) taillé en biseau à ses extrémités, et fermé par deux plaques de verre à faces parallèles, inclinées entre elles de 143 degrés. Ce tube est en communication, d'une part, avec une cloche H, dans laquelle est un baromètre à siphon; de l'autre avec un robinet à l'aide duquel on peut faire le vide dans l'appareil et y introduire ensuite différents gaz. Après avoir fait le vide dans le tube AB, on le fait traverser par un rayon de lumière SA, qui s'écarte de la normale d'une quantité $r - i$ à la première incidence, et s'en rapproche d'une quantité $i' - r'$ à la deuxième. Ces deux déviations s'ajoutant, la déviation totale d est $r - i + i' - r'$. Or, dans le cas de la déviation minimum, on a $i = r'$ et $r = i'$, d'où $d = A - 2i$, puisque $r + i' = A$ (435). L'indice du vide à l'air, qui est évidemment $\frac{\sin r}{\sin i'}$, a donc pour valeur

$$\frac{\sin \frac{A}{2}}{\sin \left(\frac{A - d}{2}\right)} \quad [4].$$

Il suffit donc de connaître l'angle réfringent A et l'angle de déviation minimum *d*, pour en déduire l'indice de réfraction du vide à l'air, genre d'indice qu'on désigne sous le nom d'*indice absolu* ou d'*indice principal*.

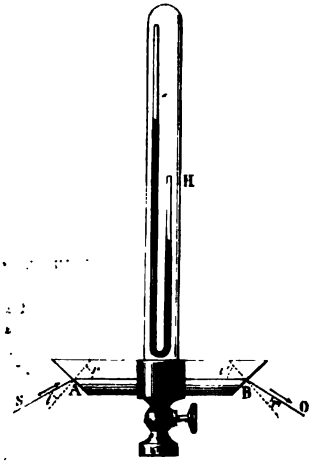


Fig. 276.

Pour obtenir l'indice absolu d'un gaz autre que l'air, après avoir fait le vide dans l'appareil, on y fait passer ce gaz; puis mesurant les angles A et *d*, la formule [4] ci-dessus fait connaître l'indice de réfraction du gaz à l'air. Connaissant déjà l'indice du vide à l'air, le rapport de ces deux indices donne l'indice de réfraction du vide au gaz donné, c'est-à-dire son indice absolu.

Au moyen de cet appareil, M. Biot et Arago ont constaté que les indices de réfraction des gaz sont toujours très-petits par rapport à ceux des solides et des liquides, et que, pour un même gaz, la *puissance réfractive* est proportionnelle à la densité, en appelant puissance réfractive d'une substance le carré de son indice de réfraction diminué d'une unité, c'est-à-dire l'expression $n^2 - 1$. Le quotient de la puissance réfractive par la densité se nomme *pouvoir réfringent*.

Tableau des indices de réfraction absolue.

SUBSTANCES.	INDICES.	SUBSTANCES.	INDICES.
Diamant	1,755	Alcool	1,374
Rubis	1,779	Albumine	1,360
Spath d'Islande, réfr. ord.	1,6543	Ether	1,358
— réfr. extr.	1,4833	Humeur aqueuse	1,3366
Flint-glass	1,605	Cristallin	1,384
Quartz, réfr. ordinaire	1,558	Humeur vitrée	1,3394
— réfr. extraordinaire	1,548	Eau	1,3358
Glace de Saint-Gobain	1,543	Glace	1,310
Crown-glass	1,534	Air	1,0003

LENTILLES, LEURS EFFETS.

440. Différentes espèces de lentilles. — On nomme *lentilles* des milieux transparents qui, vu la courbure de leur surface, ont la propriété de faire converger ou diverger les rayons lumineux qui

les traversent. Suivant le genre de cette courbure, les lentilles sont dites sphériques, cylindriques, elliptiques, paraboliques. Les lentilles sphériques sont les seules en usage dans les instruments d'optique. Elles sont généralement en *crown-glass*, verre qui ne contient pas de plomb, ou en *flint-glass*, verre qui en contient et qui est plus réfringent que le crown.

En combinant des surfaces sphériques entre elles ou avec des surfaces planes, on forme six espèces de lentilles représentées en coupe dans la figure 277; quatre sont formées par deux surfaces

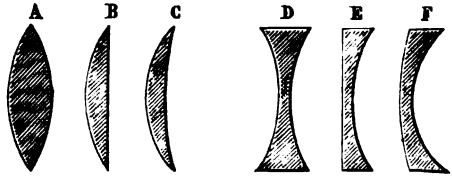


Fig. 277.

sphériques, et deux par une surface plane et une surface sphérique.

La première A est dite *bi-convexe;* la seconde B, *plan-convexe;* la troisième C, *concave-convexe convergente;* la quatrième D, *bi-concave;* la cinquième E, *plan-concave;* et la dernière F, *concave-convexe divergente*. La lentille C s'appelle aussi *ménisque convergent*, et la lentille F *ménisque divergent*.

Les trois premières, qui sont plus épaisses au centre que sur les bords, sont *convergentes;* les dernières, qui sont plus minces au centre que sur les bords, sont *divergentes*. Dans le premier groupe, il suffit de considérer la lentille bi-convexe, et dans le second, la lentille bi-concave, les propriétés de chacune de ces lentilles s'appliquant à toutes celles du même groupe.

Dans les lentilles dont les deux surfaces sont sphériques, les centres de ces surfaces sont dits *centres de courbure;* la droite indéfinie menée par ces deux centres est l'*axe principal*. Dans une lentille plan-concave ou plan-convexe, l'axe principal est la perpendiculaire abaissée du centre de la face sphérique sur la face plane.

Afin de pouvoir comparer la marche des rayons lumineux dans les lentilles à celle qui a lieu dans les prismes, on fait la même hypothèse que pour les miroirs courbes (413), c'est-à-dire qu'on suppose les surfaces des lentilles formées d'une infinité d'éléments plans infiniment petits; la *normale* en un point quelconque est alors la perpendiculaire au plan tangent qui contient l'élément correspon-

dant. On sait, en géométrie, que toutes les normales à une même surface sphérique vont passer par son centre. Dans l'hypothèse ci-dessus, on peut toujours concevoir, aux points d'incidence et d'émergence, deux surfaces planes plus ou moins inclinées entre elles et produisant ainsi l'effet du prisme. En continuant cette comparaison, il est permis d'assimiler les trois lentilles A, B, C à une suite de prismes réunis par leurs bases, et les lentilles D, E, F à une suite de prismes réunis par leurs sommets : ce qui montre comment les premières doivent rapprocher les rayons, et les dernières les écarter, puisqu'on a vu que lorsqu'un rayon lumineux traverse un prisme, il est dévié vers la base (434).

441. **Foyers dans les lentilles bi-convexes.** — Dans les lentilles, de même que dans les miroirs, on nomme *foyers* des points où vont concourir les rayons réfractés ou leurs prolongements. Les lentilles bi-convexes présentent les mêmes espèces de foyers que les miroirs concaves, savoir : des foyers réels et des foyers virtuels.

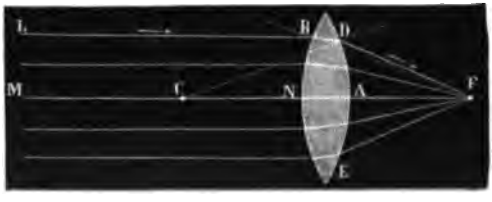


Fig. 278.

Foyers réels. — Considérons d'abord, comme nous l'avons fait pour les miroirs, le cas où les rayons lumineux qui tombent sur la lentille sont parallèles à son axe principal, comme le représente la figure 278. Dans ce cas, tout rayon incident LB, en s'approchant de la normale au point d'incidence B, et en s'en écartant au point d'émergence D, se réfracte deux fois vers l'axe qu'il vient couper en F. Tous les rayons parallèles à l'axe se réfractant de la même manière, le calcul démontre qu'ils viennent très-sensiblement passer par le point F, tant que l'arc DE ne dépasse pas 10 à 12 degrés. Ce point est encore désigné sous le nom de *foyer principal*, et la distance FA est la *distance focale principale.* Elle est constante pour une même lentille, mais variable avec le rayon de courbure et l'indice de réfraction. Dans les lentilles ordinaires, qui sont en crown, le foyer principal coïncide très-approximativement avec le centre de courbure.

Soit actuellement le cas où l'objet lumineux étant au delà du foyer principal, il est assez rapproché pour que tous les rayons incidents forment un faisceau divergent comme le représente la figure 279. Dans ce cas, le point lumineux étant en L, si l'on

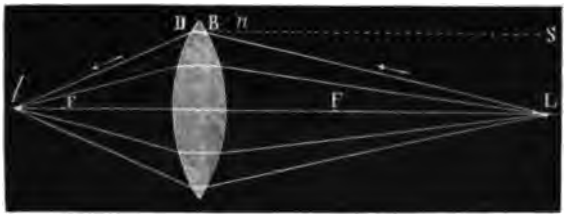


Fig. 279.

compare la marche du rayon divergent LB à celle du rayon SB parallèle à l'axe, on reconnaît que le premier fait avec la normale un angle LB*n* plus grand que l'angle SB*n*, il doit donc aussi faire un angle de réfraction plus grand; d'où il résulte qu'après avoir traversé la lentille il rencontre l'axe en un point *l* plus éloigné que le foyer principal F. Tous les rayons partis du point L venant ainsi concourir sensiblement au même point *l*, ce dernier est le *foyer conjugué* du point L; cette dénomination exprime ici, de même que dans les miroirs, la relation qui existe entre les deux points L et *l*, relation telle que si le point lumineux est porté en *l*, réciproquement le foyer passe en L.

A mesure que l'objet L s'approche de la lentille la divergence

Fig. 280.

des rayons émergents augmente et le foyer conjugué *l* s'éloigne; lorsque l'objet L coïncide avec le foyer principal, les rayons émergents, de l'autre côté de la lentille, sont parallèles à l'axe, et alors il n'y a pas de foyer, ou, ce qui est la même chose, il se fait à

l'infini. Dans ce cas, les rayons réfractés étant parallèles, l'intensité de la lumière ne décroît que très-lentement, et une seule lampe peut alors éclairer à de grandes distances. Il suffit pour cela de la placer au foyer d'une lentille bi-convexe, comme le montre la figure 280.

Foyers virtuels. — Avec les lentilles bi-convexes, le foyer est virtuel lorsque l'objet lumineux L est placé entre la lentille et le

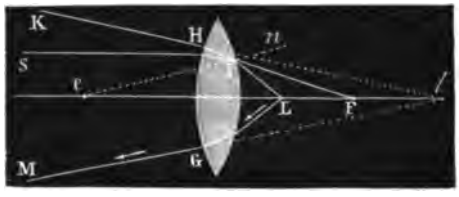


Fig. 281.

foyer principal, comme le montre la figure 281. Dans ce cas, les rayons incidents LI formant avec la normale des angles plus grands que ceux formés par les rayons FI émis du foyer principal, il en résulte qu'après l'émergence les premiers rayons s'éloignent de l'axe plus que les derniers, et forment un faisceau divergent HK, GM. Ces rayons ne peuvent donc donner lieu à aucun foyer réel; mais leurs prolongements concourent en un même point *l* situé sur l'axe, et c'est ce point qui est le foyer virtuel du point L (408).

442. Foyers dans les lentilles bi-concaves. — Avec les lentilles bi-concaves, il ne se forme que des foyers virtuels, quelle que soit la distance de l'objet. Soit d'abord un faisceau de rayons parallèles

Fig. 282.

Fig. 283.

à l'axe : un rayon quelconque SI (fig. 282) se réfracte au point d'incidence I en s'approchant de la normale CI. Au point d'émergence G, il se réfracte de nouveau, mais en s'écartant de la normale GC', en sorte qu'il se brise deux fois dans le même sens pour

s'éloigner de l'axe CC'. La même chose ayant lieu pour tout autre rayon S'KMN, il en résulte qu'après avoir traversé la lentille les rayons forment un faisceau divergent GH, MN. Il ne peut donc y avoir de foyer réel ; mais les prolongements de ces rayons se rencontrent en un point F, qui est le foyer virtuel principal.

Dans le cas où les rayons partent d'un point L (fig. 283), situé sur l'axe, on trouve, par la même construction, qu'il se forme un foyer virtuel en *l*, lequel est entre le foyer principal et la lentille.

443. **Détermination expérimentale du foyer principal des lentilles.** — Pour déterminer le foyer principal d'une lentille bi-convexe, il suffit de l'exposer aux rayons solaires, en ayant soin que son axe principal leur soit parallèle. Recevant alors, sur un écran de verre dépoli, le faisceau émergent, on détermine facilement le point où viennent concourir les rayons ; c'est le foyer principal.

Si la lentille est bi-concave, on recouvre la face *ab* (fig. 284) d'un corps opaque, de noir de fumée, par exemple, en réservant, dans un même plan méridien et à égale distance de l'axe, en *a* et en *b*, deux petits disques non noircis, qui laissent passer la lumière ; puis on reçoit sur l'autre face de la lentille, parallèlement à l'axe, un faisceau de lumière solaire, et on avance ou on recule l'écran P, qui reçoit les rayons emergents, jusqu'à ce que les images A et B des petites ouvertures *a* et *b* soient distantes l'une de l'autre du double de *ab*. L'intervalle DI est alors égal à la distance focale FD, à cause de la similitude des triangles F*ab* et FAB.

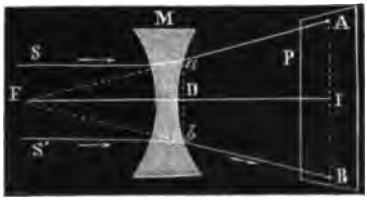


Fig. 284.

444. **Centre optique, axes secondaires.** — Pour toute lentille, il existe un point nommé *centre optique*, qui est situé sur l'axe, et qui jouit de cette propriété, que tout rayon lumineux, passant par ce point, n'éprouve pas de déviation angulaire, c'est-à-dire que le rayon émergent est parallèle au rayon incident. Pour démontrer l'existence de ce point dans une lentille bi-convexe, soient menés à ses deux surfaces deux rayons de courbure parallèles CA et C'A' (fig. 285). Les deux éléments plans qui appartiennent à la surface de la lentille, en A et A', étant parallèles entre eux, comme perpendiculaires à deux droites parallèles, on peut admettre que le rayon réfracté KAA'K' se propage dans un milieu à faces parallèles ; par

conséquent, le rayon qui se présente en A, sous l'inclinaison convenable pour qu'après s'être réfracté il suive la direction AA', doit sortir parallèle à sa première direction (432); le point O où la droite AA' coupe l'axe est donc le centre optique. Pour déterminer la position de ce point, dans le cas où la courbure des deux faces est la même, ce qui est le cas ordinaire, il suffit d'observer que les triangles COA et C'OA' sont égaux, et qu'on a OC = OC', ce qui fait connaître le point O. Si les courbures sont inégales, les triangles COA

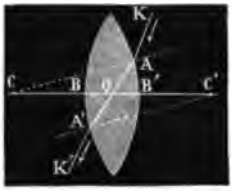


Fig. 285.

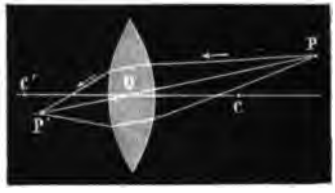


Fig. 286.

et C'OA' sont semblables, et on en déduit CO ou C'O, et, par conséquent, le point O.

Dans les lentilles bi-concaves ou concaves-convexes, le centre optique se détermine par la même construction que ci-dessus. Dans les lentilles qui ont une face plane, ce point est à l'intersection même de l'axe par la face courbe.

Toute droite PP' (fig. 286) qui passe par le centre optique sans passer par les centres de courbure, est un *axe secondaire*. D'après la propriété du centre optique, tout axe secondaire représente un rayon lumineux rectiligne passant par ce point, car, vu la petite épaisseur des lentilles, on peut admettre que les rayons qui passent par le centre optique restent en ligne droite; c'est-à-dire qu'on peut négliger la petite déviation qu'éprouvent les rayons, tout en restant parallèles, lorsqu'ils traversent un milieu à faces parallèles (fig. 269, page 399).

Tant que les axes secondaires ne font avec l'axe principal qu'un petit angle, on peut leur appliquer tout ce qui a été dit jusqu'ici de l'axe principal; c'est-à-dire que les rayons émis d'un point P (fig. 286), situé sur un axe secondaire PP', viennent, à très-peu près, concourir en un même point P' de cet axe, et, selon que la distance du point P à la lentille est plus grande ou plus petite que la distance focale principale, le foyer ainsi formé est conjugué ou

virtuel. Ce principe et la base de ce qui suit sur la formation des images.

445. **Formation des images dans les lentilles bi-convexes.** — Dans les lentilles, de même que dans les miroirs, l'image d'un objet est l'ensemble des foyers de chacun de ses points; d'où il résulte que les images fournies par les lentilles sont réelles ou virtuelles dans les mêmes cas que les foyers, et que leur construction se ramène à la recherche d'une suite de points, ainsi qu'on l'a déjà vu pour les miroirs (417).

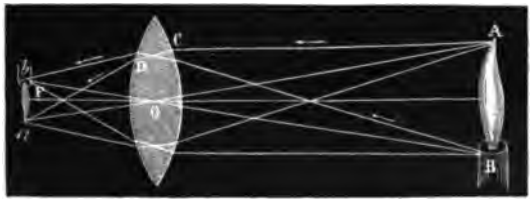


Fig. 287.

1° *Image réelle.* — Soit d'abord le cas où, la lentille étant bi-convexe, l'objet AB (fig. 287) est placé au delà du foyer principal. Si l'on tire l'axe secondaire A*a* du point extrême A, tout rayon AC, émis de ce point, se réfracte en C et en D, deux fois dans le même sens, en se rapprochant de l'axe secondaire qu'il va couper en *a*. Les autres rayons émis du point A venant, d'après ce qui a été dit dans le paragraphe précédent, concourir aussi en *a*, ce point est le foyer conjugué du point A. Si l'on tire maintenant l'axe secondaire du point B, on trouve de même que les rayons émis de ce point vont former leur foyer en *b*, et comme les points situés entre A et B ont évidemment leur foyer entre *a* et *b*, il se forme en *ab* une image *réelle et renversée* de l'objet AB.

Pour voir cette image, il faut la recevoir sur un écran blanc qui la réfléchit, ou placer l'œil dans la direction des rayons émergents.

Réciproquement, si *ab* était l'objet lumineux ou éclairé qui envoie des rayons, son image irait se faire en AB. Il suit de là ces deux conséquences importantes à retenir pour la théorie des instruments d'optique qui seront décrits plus tard : 1° *Si un objet, même très-grand, est assez éloigné d'une lentille bi-convexe, l'image réelle et renversée qu'on en obtient est très-petite, très-rapprochée du foyer principal, et un peu au delà de ce point par rapport à la lentille;* 2° réciproquement, *si un objet très-petit est placé*

près du foyer principal, un peu en avant de ce point, l'image, qui va se former à une grande distance, est très-amplifiée, et l'est d'autant plus que l'objet est plus voisin du foyer principal. Ces deux principes sont faciles à constater par l'expérience, en recevant sur un écran, dans l'obscurité, l'image de la flamme d'une bougie placée successivement à des distances variables au delà d'une lentille bi-convexe.

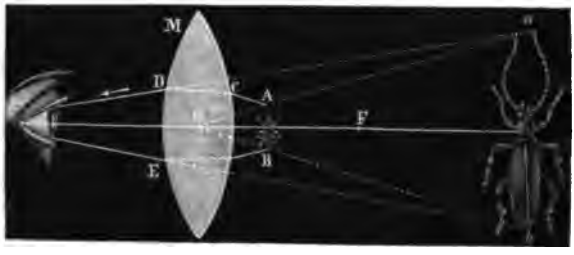


Fig. 288.

2° *Image virtuelle.* — Soit actuellement le cas où l'objet AB (fig. 288) est placé entre la lentille et son foyer principal. Si l'on tire l'axe secondaire O*a* du point A, tout rayon AC, après s'être réfracté deux fois, sort divergent par rapport à cet axe, puisque le point A est placé à une distance moindre que la distance focale principale (441). Ce rayon, prolongé en sens contraire de sa direction, va donc couper l'axe O*a* en un point *a*, qui est le foyer virtuel du point A. En menant l'axe secondaire du point B, on trouve de même que le foyer virtuel de ce point se forme en *b*. On a donc en *ab* l'image de AB. *Cette image est redressée, virtuelle et plus grande que l'objet.*

Le grossissement est d'autant plus considérable que la lentille est plus convexe et l'objet plus près du foyer principal. On verra ci-dessous comment ce grossissement peut se calculer au moyen des formules relatives aux lentilles (450). Les lentilles bi-convexes, ainsi employées comme verres grossissants, prennent le nom de *loupes* ou de *microscopes simples* (463).

446. **Formation des images dans les lentilles bi-concaves.** — Les lentilles bi-concaves, de même que les miroirs convexes, ne donnent que des images virtuelles, quelle que soit la distance de l'objet.

Soit, en effet, un objet AB (fig. 289) placé devant une pareille

lentille. Si l'on tire d'abord l'axe secondaire du point A, tous les rayons AC, AI, émis de ce point, se réfractent deux fois dans le même sens pour s'écarter de l'axe AO; de sorte que l'œil qui reçoit les rayons émergents DE et GH, les juge partis du point où leurs prolongements vont rencontrer en *a* l'axe secondaire AO. De même, en menant l'axe secondaire du point B, les rayons émis de ce point forment un faisceau de rayons divergents dont les directions prolongées vont concourir en *b*. L'œil voit donc en *ab* une image virtuelle de AB, *laquelle est toujours redressée et plus petite que l'objet.*

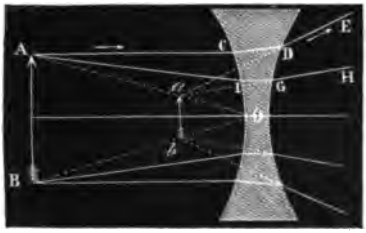


Fig. 289.

447. **Règle générale pour la construction des images dans les lentilles.** — Nous formulerons ici, pour la construction des images dans les lentilles, une règle analogue à celle déjà donnée pour les miroirs (419); mais, auparavant, il importe de bien observer que de même qu'un point situé sur l'axe principal a son image sur cet axe, un point situé sur un axe secondaire a aussi son image sur ce dernier. Remarquons encore qu'il n'y a que les rayons partis d'un même point qui fassent image au point où ils se coupent; des rayons partis de points différents ne produisent jamais d'image par leur intersection. Cela posé, considérant le cas d'une lentille biconvexe, et supposant l'objet au delà du foyer principal, l'image de chacun de ses points s'obtient par la construction suivante :

1° *Par le point donné et par le centre optique de la lentille, tirez un axe secondaire;* 2° *menez du point donné à la lentille un rayon incident;* 3° *joignez le point d'incidence au centre de courbure par une droite qui représente la normale;* 4° *menez le rayon réfracté en le rapprochant de la normale d'une quantité marquée par l'indice de réfraction de l'air au verre;* 5° *tracez la normale du point d'émergence;* 6° *enfin, tirez le rayon émergent, en l'écartant de la normale d'une quantité indiquée par l'indice de réfraction du verre à l'air. Le rayon émergent ainsi obtenu va couper l'axe secondaire en un point qui est le lieu de l'image réelle du point donné.* En appliquant la même construction à chaque point d'un objet placé devant une lentille, on aura toujours son image.

Si l'objet est placé entre la lentille et son foyer principal, les constructions restent les mêmes; seulement, ce ne sont plus les rayons émergents qui rencontrent les axes secondaires, mais bien leurs prolongements. Même règle pour les lentilles bi-concaves.

* 448. **Aberration de sphéricité, caustiques.** — Dans la théorie des foyers et des images fournis par les différentes espèces de lentilles sphériques, on a admis jusqu'ici que les rayons émis d'un même point allaient, après s'être réfractés, concourir très-sensiblement en un point unique. Il en est ainsi, en effet, quand l'ouverture de la lentille, c'est-à-dire l'angle qu'on obtient en joignant ses bords au foyer, ne dépasse pas 10 à 12 degrés. Pour une ouverture plus grande, les rayons qui traversent la lentille près des bords ont leur point de concours plus près que ceux qui la traversent près de l'axe; c'est-à-dire qu'il se produit un phénomène analogue à celui qu'on a observé dans les miroirs (423), sous le nom d'aberration de sphéricité par réflexion, et qu'on désigne ici sous le nom d'*aberration de sphéricité par réfraction*. Les surfaces brillantes qui se forment alors dans l'espace par l'intersection des rayons réfractés se nomment *caustiques par réfraction*.

L'aberration de sphéricité nuit à la netteté des images. On obvie à ce défaut des lentilles en plaçant, au-devant, des diaphragmes percés d'une ouverture centrale, de manière à laisser passer les rayons qui se présentent vers le centre, mais à arrêter ceux qui tendent à se réfracter vers les bords. Du reste, en combinant deux lentilles de courbures convenables, on parvient à détruire l'aberration de sphéricité.

* 449. **Formules relatives aux lentilles.** — Dans toute lentille, on peut traduire en équation la relation qui existe entre la distance de l'image, celle de l'objet,

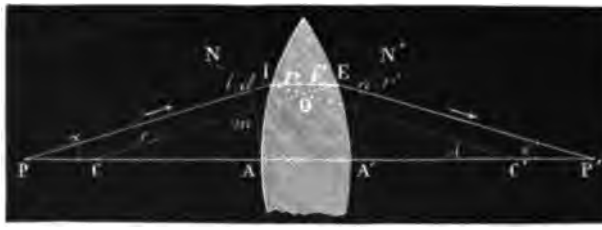


Fig. 290.

les rayons de courbure et l'indice de la substance dont la lentille est formée. Soit d'abord le cas d'une lentille bi-convexe : P étant un point lumineux situé sur l'axe (fig. 290), soient PI un rayon incident, IE sa direction dans l'intérieur de la lentille, EP' le rayon émergent, en sorte que P' est le foyer conjugué de P. Soient encore C'I et CE les normales aux points d'incidence et d'émergence, et posons IPA $= \alpha$, EP'A' $= \beta$, ECA' $= \gamma$, IC'A $= \delta$, NIP $= i$, EIO $= r$, IEO $= i'$, N'EP' $= r'$.

Les angles i et r' étant extérieurs, l'un au triangle PIC', l'autre au triangle CEP', on a $i = \alpha + \delta$, et $r' = \gamma + \beta$, d'où $i + r' = \alpha + \beta + \gamma + \delta$ [1]. Or, au point I on a $\sin i = n \sin r$, et au point E, $\sin r' = n \sin i'$ (428); mais en supposant l'arc AI d'un très-petit nombre de degrés, il en est de même des angles i, r, i' et r', d'où l'on peut remplacer, dans la formule ci-dessus, les sinus par leurs arcs, ce qui donne $i = nr$ et $r' = ni'$; d'où $i + r' = n(r + i')$. D'ailleurs les deux triangles IOE et COC' ayant

l'angle O égal, on a $r + i' = \gamma + \delta$, d'où $i + r' = n(\gamma + \delta)$. Portant cette valeur dans l'équation [1], il vient

$$n(\gamma + \delta) = \alpha + \beta + \gamma + \delta, \text{ ou } (n - 1)(\gamma + \delta) = \alpha + \beta \text{ [2]}.$$

Cela posé, si l'on conçoit que les arcs α et γ soient décrits des points P et C comme centres avec un rayon égal à l'unité, et si du point P on décrit l'arc dA avec le rayon PA, on a les proportions

$$\frac{\alpha}{Ad} = \frac{1}{PA}, \quad \text{et } \frac{\gamma}{A'E} = \frac{1}{CA'};$$

d'où l'on tire $\alpha = \frac{Ad}{AP}$ et $\gamma = \frac{A'E}{CA'}$, ou $\alpha = \frac{AI}{p}$ et $\gamma = \frac{A'E}{R}$, en posant $AP = p$, $CA' = R$, et en remplaçant l'arc Ad par l'arc AI qui lui est sensiblement égal. Sur l'autre face de la lentille, si l'on suppose encore les arcs β et δ décrits d'un rayon égal à l'unité, et l'arc A'n décrit avec le rayon P'A', en faisant $C'A = R'$, et $A'P' = p'$, on a de même

$$\delta = \frac{AI}{R'}, \text{ et } \beta = \frac{A'n}{P'A'} = \frac{A'E}{p'}.$$

Portant ces valeurs dans l'équation [2], il vient

$$(n - 1)\left(\frac{A'E}{R} + \frac{AI}{R'}\right) = \frac{AI}{p} + \frac{A'E}{p'}.$$

Si l'on admet que les arcs A'E et AI soient égaux, ce qui est d'autant plus près de la vérité que les rayons incidents s'écartent moins de l'axe, on peut supprimer le facteur commun, ce qui donne enfin

$$(n - 1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right) = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} \text{ [3]}.$$

Telle est la formule des lentilles bi-convexes. Si l'on y fait $p = \infty$, on trouve

$$\frac{1}{p'} = (n - 1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right),$$

p' désignant lors la distance focale principale. En représentant celle-ci par f, on a

$$\frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right) \text{ [4]},$$

équation dont il est facile de tirer la valeur de f. En ayant égard à la formule [4], la formule [3] prend la forme

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} \text{ [5]}$$

qui est celle sous laquelle on la considère ordinairement.

Lorsque l'image est virtuelle, p' change de signe, et la formule [5] prend la forme

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} \text{ [6]}.$$

Dans les lentilles bi-convexes, p' et f conservent le même signe, mais celui de p change; la formule [5] devient alors

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f} \quad [7].$$

Du reste, la formule [7] peut s'obtenir par les mêmes raisonnements que ci-dessus.

* 450. **Mesure du grossissement.** — Le grossissement que donne une lentille, quand on l'emploie comme loupe, se déduit facilement de la formule [6] ci-dessus, qui s'applique à l'image virtuelle. En effet, l'objet étant AB et son image se formant en ab (fig. 288), si l'on conçoit une droite de A en B et une autre de a en b, on a deux triangles semblables Oab et OAB, qui donnent la proportion $\frac{ab}{AB} = \frac{p'}{p}$. Or, le grossissement n'est autre chose que le rapport $\frac{ab}{AB}$; il peut donc aussi se représenter par le rapport $\frac{p'}{p}$. Par conséquent il suffit de tirer ce dernier de l'équation

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}, \text{ qui conduit à celle-ci : } \frac{p'}{p} = \frac{f}{f-p}.$$

Le grossissement est donc égal à $\frac{f}{f-p}$.

CHAPITRE IV

DISPERSION ET ACHROMATISME.

451. **Décomposition de la lumière blanche, spectre solaire.** — Le phénomène de la réfraction n'est pas aussi simple qu'on l'a supposé jusqu'ici : quand la lumière *blanche*, c'est-à-dire celle qui nous arrive du soleil, passe d'un milieu dans un autre, elle n'est pas seulement déviée, *elle est décomposée en plusieurs espèces de lumières*, phénomène qu'on désigne sous le nom de *dispersion*.

Pour démontrer que la lumière blanche est décomposée par l'effet de la réfraction, on reçoit, dans une chambre obscure, un faisceau de lumière solaire SA (fig. 291), à travers une très-petite ouverture pratiquée dans le volet. Ce faisceau tend à aller former en K une image ronde et incolore du soleil; mais si l'on interpose, sur son passage, un prisme en flint-glass P, disposé horizontalement, le faisceau, à l'entrée et à la sortie du prisme, se réfracte vers la base de celui-ci, et au lieu d'une image ronde et incolore, on reçoit, sur un écran éloigné, une image H, qui, dans la direction horizontale, est de même dimension que le faisceau primitif, mais oblongue

dans le sens vertical et colorée des belles teintes de l'arc-en-ciel. Cette image colorée s'appelle *spectre solaire*. Il existe en réalité, dans le spectre, une infinité de teintes, mais on en distingue sept principales, disposées, à partir de la plus réfrangible, dans l'ordre suivant, qui forme un vers alexandrin : *violet*, *indigo*, *bleu*, *vert*, *jaune*, *orangé*, *rouge*. Ces couleurs n'occupent pas toute une étendue égale dans le spectre ; c'est le violet qui a le plus d'étendue et l'orangé qui en a le moins.

Avec des prismes diaphanes de différentes substances, ou avec

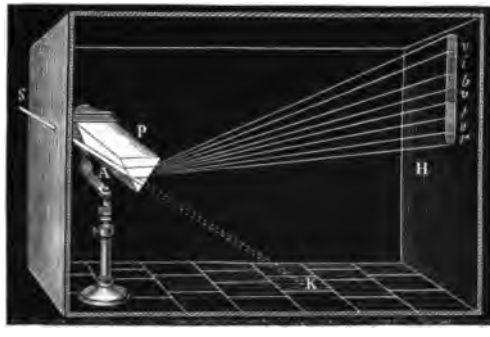


Fig. 291.

des prismes de verre creux remplis de divers liquides, on obtient constamment des spectres formés des mêmes couleurs et dans le même ordre ; mais, à angle réfringent égal, la longueur du spectre varie avec la substance dont le prisme est formé. Celles qui lui donnent le plus d'étendue sont dites plus *dispersives*, et la dispersion se mesure par la différence des indices de réfraction des rayons extrêmes du spectre. Pour le flint-glass, cette différence est 0,0433 ; pour le crown-glass, elle est 0,0246 ; la dispersion du flint est donc presque double de celle du crown.

Pour des prismes de même substance, la dispersion décroît avec l'angle réfringent du prisme ; car si cet angle était nul, les faces d'incidence et d'émergence seraient parallèles, et la lumière ne serait pas décomposée.

Dans les spectres que donnent les lumières artificielles, on n'observe pas d'autres couleurs que celles que présente le spectre solaire, et leur ordre est le même ; mais, en général, il en manque quelques-unes. Leur intensité relative est aussi très-modifiée. La

nuance qui domine dans une flamme artificielle est également celle qui domine dans son spectre. Les flammes jaunes, rouges, vertes, donnent des spectres où la teinte dominante est le jaune, le rouge, le vert.

Pour produire un spectre solaire dont les sept couleurs principales soient assez bien séparées, l'ouverture par laquelle entre la lumière solaire ne doit avoir que quelques millimètres de diamètre, et l'angle réfringent du prisme étant de 60 degrés, l'écran sur lequel on reçoit le spectre doit être éloigné de 5 à 6 mètres.

452. **Les couleurs du spectre sont simples et inégalement réfrangibles.** — Si l'on isole une des couleurs du spectre en interceptant les autres au moyen d'un écran E, comme le montre la figure 292, et qu'on la fasse passer à travers un second prisme B, on observe bien encore une déviation, mais la lumière reste identiquement la même, c'est-à-dire que l'image reçue sur l'écran H est violette, si l'on a laissé passer le faisceau violet; bleue, si l'on a laissé passer le faisceau bleu : ce qui démontre que les couleurs du spectre sont *simples*, c'est-à-dire indécomposables par le prisme.

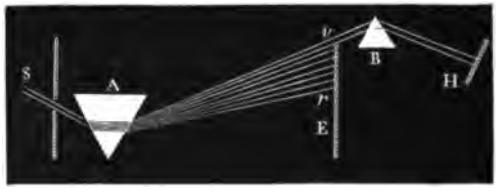


Fig. 292.

De plus, les couleurs du spectre sont inégalement *réfrangibles*, c'est-à-dire qu'elles possèdent des indices de réfraction différents. La forme allongée du spectre suffirait pour démontrer l'inégale réfrangibilité des couleurs simples, car il est évident que la couleur violette, qui est la plus déviée vers la base du prisme (fig. 291), est aussi la plus réfrangible, et que la couleur rouge, qui est la moins déviée, est la moins réfrangible. Mais on peut encore démontrer l'inégale réfrangibilité des couleurs simples par plusieurs expériences. Nous citerons les deux suivantes :

1° On colle sur un carton noir, l'une à la suite de l'autre, deux bandes étroites de papier, la première rouge, la seconde violette; puis on les regarde à travers un prisme. On les voit déviées toutes les deux, mais inégalement; la bande rouge l'est moins que la

bande violette, ce qui fait voir que les rayons rouges sont les moins réfractés.

2° On fait encore l'expérience des prismes croisés de Newton : sur un premier prisme A (fig. 293), disposé horizontalement, on reçoit un faisceau de lumière blanche S, qui, lorsqu'il ne traverse

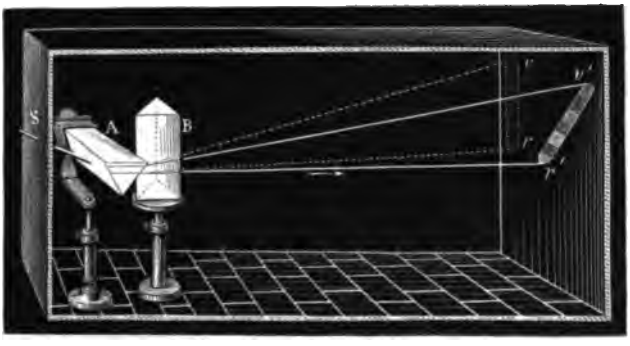


Fig. 293.

que le prisme A, va former le spectre *rv* sur un écran eloigné. Si l'on place alors, verticalement derrière le premier, un second prisme B, de manière qu'il soit lui-même traversé par le faisceau réfracte, le spectre *vr* est dévié vers la base du prisme vertical ; mais au lieu de l'être parallèlement à lui-même, comme il arriverait si toutes

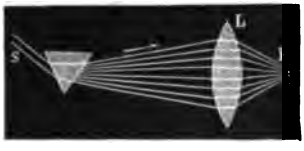


Fig. 294.

Fig. 295.

les couleurs du spectre étaient réfractées également, il l'est obliquement en *r'v'*, ce qui fait voir qu'en allant du rouge au violet, les couleurs sont de plus en plus réfrangibles.

Ces diverses expériences démontrent que l'indice de réfraction varie pour chaque couleur ; en outre, il est à observer que tous les rayons d'une même couleur n'ont pas le même indice. En effet, dans la zone rouge, par exemple, les rayons qui forment l'extrémité du spectre sont moins réfractés que ceux qui sont voisins de la

zone orangée. Dans les calculs des indices de réfraction (437), on est convenu de prendre pour indice d'une substance celui du rayon jaune dans le spectre donné par cette substance.

453. **Recomposition de la lumière blanche.** — Après avoir décomposé la lumière blanche, il restait à reconnaître si on pouvait la reproduire en réunissant les différents faisceaux séparés par le prisme. Or, cette recomposition peut s'opérer par un grand nombre de procédés :

Fig. 296.

1° Si l'on reçoit le spectre sur un second prisme de même angle réfringent que le premier, et tourné en sens contraire, comme le montre la figure 295, ce dernier prisme réunit les différentes couleurs du spectre, et on observe que le faisceau émergent E, parallèle au faisceau S, est incolore.

2° On reçoit le spectre sur une lentille bi-convexe (fig. 294).

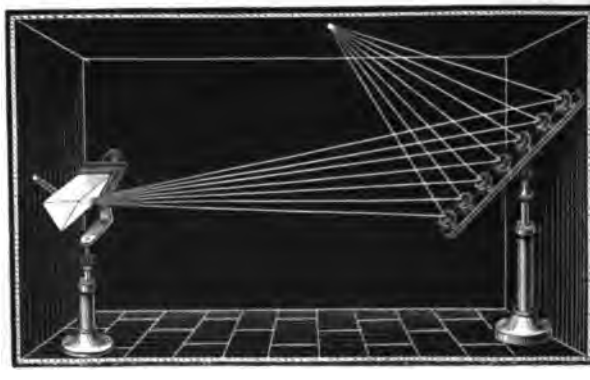


Fig. 297.

et plaçant un écran blanc à son foyer, on y recueille une image blanche du soleil; un ballon de verre rempli d'eau produirait le même effet que la lentille.

3° On fait tomber le spectre sur un miroir concave (fig. 296), et au foyer, sur un écran de verre dépoli, se forme une image blanche.

4° On recompose encore la lumière au moyen d'une jolie expérience qui consiste à recevoir les sept couleurs du spectre respectivement sur sept petits miroirs de verre, à faces bien parallèles, pour

ne pas décomposer la lumière, et pouvant s'incliner dans tous les sens pour porter la lumière réfléchie dans telle direction qu'on le veut (fig. 297). En dirigeant convenablement ces miroirs, on fait d'abord tomber, sur le plafond, par exemple, les sept faisceaux réfléchis, de manière à former dessus sept images distinctes, rouge, orangée, jaune... ; puis faisant mouvoir les miroirs de manière que les sept images viennent exactement se superposer, on obtient alors une image unique qui est blanche.

5° Enfin, on démontre que les sept couleurs du spectre forment du blanc au moyen du disque de Newton. C'est un disque de car-

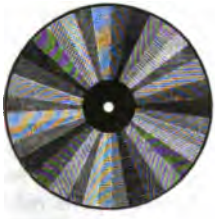


Fig. 298.

Fig. 299.

ton de 35 centimètres de diamètre environ ; le centre et les bords en sont recouverts de papier noir, et dans l'intervalle sont collées des bandes de papier rouges, orangées, jaunes, vertes, bleues, indigo et violettes, allant du centre à la circonférence, de manière à imiter circulairement cinq spectres successifs par la nature des teintes et par leur étendue relative (fig. 298). En imprimant à ce disque un mouvement de rotation rapide, la rétine reçoit alors simultanément l'impression des sept couleurs du spectre, et le disque paraît

blanc (fig. 299), ou du moins d'un blanc gris, car les couleurs qui le recouvrent ne sont pas exactement celles du spectre.

454. **Théorie de Newton sur la composition de la lumière et sur la couleur des corps.** — C'est Newton qui, le premier, décomposa la lumière blanche par le prisme et la recomposa. Des diverses expériences que nous avons fait connaître ci-dessus, il conclut que la lumière blanche n'est pas homogène, mais formée de sept lumières inégalement réfrangibles, qu'il nomma lumières *simples* ou *primitives*, et que c'est en vertu de leur différence de réfrangibilité qu'elles sont séparées en traversant le prisme.

Dans cette théorie, les corps décomposent aussi la lumière par réflexion, et leur couleur propre ne dépend que de leur pouvoir réfléchissant pour les différentes couleurs simples. Ceux qui les réfléchissent toutes, dans les proportions qu'elles ont dans le spectre, sont blancs; ceux qui n'en réfléchissent aucune sont noirs. Entre ces deux limites extrêmes se présentent une infinité de nuances, suivant que les corps réfléchissent plus ou moins certaines couleurs simples et absorbent les autres. En sorte que les corps ne sont pas colorés par eux-mêmes, mais par l'espèce de lumière qu'ils réfléchissent. En effet, si, dans une chambre obscure, on éclaire successivement un même corps avec chacune des lumières du spectre, ce corps n'a plus de couleur propre; ne pouvant réfléchir que l'espèce de lumière qu'il reçoit, il paraît rouge, orangé, jaune... suivant le faisceau dans lequel il est placé. La couleur des corps varie encore avec la nature de la lumière. C'est ce qui arrive pour la lumière du gaz et des bougies, dans laquelle le jaune domine, et qui communique cette teinte aux objets qu'elle éclaire.

Telle est la théorie de Newton sur la composition de la lumière et sur la coloration des corps; elle est généralement admise par les physiciens. Quelques-uns cependant n'admettent pas sept couleurs simples. M. Brewster, professeur à Édimbourg, n'en compte que trois, qui sont le rouge, le jaune et le bleu. Ayant analysé le spectre solaire en le regardant à travers des substances colorées qui ne laissent passer que certaines couleurs et absorbent les autres, ce savant a observé qu'il existe du rouge dans toutes les parties du spectre, ainsi que du jaune et du bleu. De là, il a admis que le spectre solaire est formé de trois spectres superposés, de même étendue, l'un rouge, l'autre jaune, le troisième bleu, et que les trois spectres ont leur maximum d'intensité en des points différents, d'où résultent les différentes teintes du spectre solaire. Cette théorie n'a pas été adoptée par les physiciens français.

455. **Couleurs complémentaires.** — Newton a nommé *couleurs complémentaires* celles qui réunies forment du blanc. Le vert est complémentaire du rouge violacé, le bleu de l'orangé, le violet du jaune. Une couleur quelconque a toujours sa couleur complémentaire, car, n'étant pas blanche, il lui manque quelques-unes des couleurs du spectre pour former de la lumière blanche; le mélange de ces couleurs doit donc en donner une complémentaire de la première.

456. **Propriétés du spectre.** — On distingue, dans les couleurs du spectre, des propriétés éclairantes, des propriétés calorifiques et des propriétés chimiques.

1° *Propriétés éclairantes.* — D'après les expériences de Fraünhofer et d'Herschell, c'est dans le jaune qu'a lieu le maximum d'intensité de la lumière, et c'est dans le violet qu'a lieu le minimum.

2° *Propriétés calorifiques.* — L'intensité de la chaleur réfractée en même temps que les rayons solaires varie dans le spectre. Leslie fit voir, le premier, qu'elle croît du violet vers le rouge. Herschell fixa le maximum dans la bande obscure qui termine le rouge; Bérard, dans le rouge même. Cette différence dans les résultats fut expliquée par Seebeck, qui observa qu'elle dépendait de la nature du prisme réfringent. Avec un prisme d'eau, il trouva le maximum dans le jaune; avec un prisme d'alcool, il l'observa dans le jaune orangé; et enfin dans le rouge moyen, avec un prisme de crown.

Melloni a confirmé les expériences de Seebeck au moyen de son thermo-multiplicateur; il a trouvé, en outre, que le maximum de chaleur s'éloigne d'autant plus du jaune vers le rouge, que la substance du prisme est plus diathermane (356). Avec un prisme de sel gemme, qui est le plus diathermane de tous les corps, le maximum se forme tout à fait au delà du rouge.

3° *Propriétés chimiques.* — Dans un grand nombre de phénomènes, la lumière solaire se comporte comme un agent chimique. Par exemple, le protochlorure de mercure et le chlorure d'argent noircissent par l'action de la lumière; le phosphore diaphane devient opaque; les principes colorants d'origine végétale se détruisent. La lumière suffit même pour déterminer des combinaisons, comme il arrive avec un mélange de chlore et d'hydrogène; c'est elle, enfin, qui contribue principalement à la production de la matière verte dans les plantes. Toutefois, les diverses couleurs du spectre ne possèdent pas la même action chimique. Scheele, le premier, fit voir que l'effet du rayon violet sur le chlorure d'argent est plus sensible que celui des autres rayons. Wollaston observa même que cette action s'étendait hors du spectre visible, avec la même intensité

que dans le violet, et il en conclut qu'outre les rayons qui agissent sur la rétine, il existe des rayons invisibles qui sont plus réfrangibles. Les rayons qui possèdent la propriété de déterminer des réactions entre les éléments des corps ont reçu le nom de *rayons chimiques*.

M. Edmond Becquerel a découvert, en outre, dans le spectre, deux espèces de rayons qu'il appelle, les uns *rayons continuateurs*, et les autres *rayons phosphorogéniques*. Les premiers sont des rayons qui n'exercent point d'action chimique par eux-mêmes, mais qui ont la propriété de la continuer lorsqu'elle est commencée. Les rayons phosphorogéniques sont des rayons qui ont la propriété de rendre certains corps, le sulfure de barium, par exemple, lumineux dans l'obscurité, lorsqu'ils ont été exposés quelque temps à la lumière solaire. M. Ed. Becquerel a reconnu que le spectre phosphorogénique s'étend depuis l'indigo jusque bien au delà du violet.

* 457. **Raies du spectre.** — Les diverses couleurs du spectre solaire ne sont point continues. Pour plusieurs degrés de réfrangibilité, les rayons manquent; de là résultent, dans toute l'étendue du spectre, un grand nombre de bandes obscures très-étroites qu'on nomme les *raies du spectre*. Pour les observer, on reçoit un faisceau de lumière solaire dans une chambre obscure, par une fente très-étroite; et à la distance de 3 à 4 mètres, on regarde cette fente à travers un prisme de flint bien exempt de stries, en tenant les arêtes parallèles aux bords de la fente. On observe alors un grand nombre de raies noires très-déliées, parallèles aux arêtes du prisme et très-inégalement espacées. Si l'on regarde le spectre avec une lunette achromatique, le nombre des raies peut aller jusqu'à six cents. On en remarque sept, qui sont plus apparentes que les autres et qu'on nomme les *raies de Fraünhofer*, du nom du physicien qui, le premier, les a remarquées. Avec la lumière solaire, ces raies ont des positions fixes, ce qui donne le moyen de mesurer avec précision l'indice de chaque couleur simple. Dans les spectres formés par une lumière artificielle ou par celle des étoiles, la position relative des raies est changée; avec la lumière électrique, les raies obscures sont remplacées par des raies brillantes.

* 458. **Couleurs des objets vus au travers d'un prisme.** — Lorsqu'un corps est vu au travers d'un prisme, les portions de son contour parallèles aux arêtes du prisme paraissent colorées des teintes du spectre. Ce phénomène s'explique par l'inégale réfrangibilité des rayons lumineux réfléchis par le corps. Si l'on regarde, par exemple, une bande très-étroite de papier blanc collée sur un carton noir,

avec un prisme dont les arêtes lui soient parallèles, cette bande paraît colorée de toutes les couleurs du spectre, et c'est la teinte violette qui est la plus déviée vers le sommet du prisme. Dans cette expérience, la lumière blanche réfléchie par la bande de papier est décomposée à son passage dans le prisme, et la teinte violette, qui est la plus réfrangible, est déviée davantage, ce qui la fait paraître plus relevée.

Si la bande de papier, au lieu d'être très-étroite, a une certaine largeur, toute sa partie moyenne reste blanche; ses bords parallèles aux arêtes du prisme sont seuls colorés, les plus rapprochés du sommet, en violet mélangé de bleu et d'indigo, et les plus rapprochés de la base, en rouge mélangé d'orangé et de jaune. Pour expliquer ce phénomène, il faut concevoir la bande de papier partagée en bandes parallèles très-étroites. Chacune de celles-ci donnera, comme dans le premier cas, un spectre complet. Or, le deuxième spectre étant un peu plus bas que le premier, le troisième plus bas que le deuxième, et ainsi de suite, il en résulte une superposition successive de toutes les couleurs simples, qui produit du blanc, excepté vers les bords où la superposition n'est pas complète, et où le violet d'un côté, et le rouge de l'autre, restent isolés.

Le prisme donne le moyen d'analyser la couleur d'un corps. Pour cela, on découpe de celui-ci une bandelette étroite qu'on fixe sur un fond noir et qu'on éclaire fortement. En le regardant alors, à la distance d'un à deux mètres, avec un prisme, la lumière réfléchie par le corps est décomposée dans ses éléments, et on reconnaît quelles sont les couleurs simples qui composent la couleur propre du corps. On a constaté ainsi que la couleur de tous les corps est composée. Les pétales des fleurs, par exemple, donnent toujours un spectre nuancé de plusieurs des couleurs du spectre solaire.

* 459. **Aberration de réfrangibilité.** — Les diverses lentilles décrites précédemment (440) ont l'inconvénient, lorsqu'elles sont à une certaine distance de l'œil, de donner des images dont les contours sont irisés. Ce défaut, qui est surtout sensible dans les lentilles convergentes, est dû à l'inégale réfrangibilité des couleurs simples (452) et se désigne sous le nom d'*aberration de réfrangibilité*. En effet, les lentilles pouvant être comparées à une suite de prismes à faces infiniment petites, réunis par leurs bases, elles ne réfractent pas seulement la lumière, mais la décomposent à la manière du prisme. Il résulte de cette dispersion que les lentilles ont réellement sept foyers distincts, un pour chaque couleur du spectre. Dans les lentilles convergentes, par exemple, les rayons rouges, qui sont les

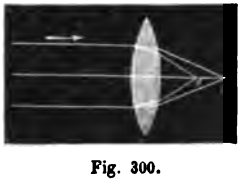


Fig. 300.

moins réfrangibles, vont former leur foyer en un point *r*, placé sur l'axe de la lentille (fig. 300), tandis que les rayons violets, se réfractant davantage, vont concourir en un point *v*, plus rapproché. Entre ces deux limites se forment les foyers orangé, jaune, vert, bleu et indigo. L'aberration de réfrangibilité est d'autant plus sensible que les lentilles sont plus convexes et que le point d'incidence des rayons qui les traversent est plus éloigné de l'axe; car alors les faces d'incidence et d'émergence sont plus inclinées entre elles. Il nous reste à faire connaître comment on corrige l'aberration de réfrangibilité dans les instruments d'optique.

* 460. **Achromatisme.** — En combinant des prismes dont les angles réfringents sont différents (433), et qui sont formés de substances inégalement dispersives (451), on est parvenu à réfracter la lumière blanche sans la décomposer. Le même résultat s'obtient avec des lentilles de substances différentes, dont les courbures sont convenablement combinées. Les contours des objets vus au travers des prismes ou des lentilles ainsi formés ne paraissant plus irisés, on dit que ces prismes et ces lentilles sont *achromatiques*, et on nomme *achromatisme* le phénomène de la réfraction de la lumière sans dispersion.

En observant le phénomène de la dispersion des couleurs avec des prismes d'eau

Pig. 301.

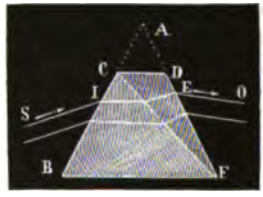


Fig. 302.

d'essence de térébenthine, de crown-glass, Newton avait été conduit à admettre que la dispersion était proportionnelle à la réfraction. Il en avait conclu qu'il ne pouvait y avoir réfraction sans dispersion, et par conséquent que l'achromatisme était impossible. Près d'un demi-siècle s'écoula avant qu'on reconnût l'erreur de Newton. Hall, savant anglais, construisit le premier, en 1733, des lunettes achromatiques, mais il ne publia pas sa découverte. C'est Dollong, opticien à Londres, qui, en 1757, montra qu'en juxtaposant deux lentilles, l'une bi-convexe en crown-glass, et l'autre concave-convexe en flint (fig. 301), on obtenait une lentille sensiblement achromatique.

Pour expliquer ce résultat, soient deux prismes BFC et CDF juxtaposés et tournés en sens contraire, comme le montre la figure 302. Si l'on suppose d'abord que ces prismes soient de même substance, l'angle réfringent CFD du second étant plus petit que l'angle réfringent BCF du premier, les deux prismes produiront le même effet qu'un prisme unique BAF, c'est-à-dire que la lumière blanche qui les traverse ne sera pas seulement déviée, mais décomposée. Au contraire, si le premier prisme BCF étant en crown, le second est en flint, on peut détruire la dispersion tout en conservant la réfraction. En effet, le flint étant plus dispersif que le crown, et la dispersion produite par un prisme diminuant avec l'angle réfringent du prisme (451), il en résulte qu'en diminuant convenablement l'angle réfringent CFD du prisme de flint, par rapport à l'angle réfringent BCF du prisme de crown, on arrive à rendre égal le pouvoir dispersif de ces prismes, et comme, d'après leur position, la dispersion a lieu en sens contraire, elle est compensée, c'est-à-dire que les rayons émergents EO sont sensiblement ramenés au parallélisme, et donnent, par conséquent, de la

lumière blanche. Toutefois, le rapport des angles BCF et CFD, qui convient au parallélisme des rayons rouges et des rayons violets, par exemple, n'étant pas celui qui convient aux rayons intermédiaires, il en résulte qu'avec deux prismes on ne peut en réalité achromatiser que deux des rayons du spectre. Pour obtenir l'achromatisme parfait, il faudrait sept prismes de substances inégalement dispersives et dont les angles réfringents seraient convenablement déterminés.

Quant à la réfraction, elle n'est pas corrigée en même temps que la dispersion, car il faudrait pour cela que la puissance réfractive des corps variât, comme l'avait supposé Newton, dans le même rapport que leur pouvoir dispersif, ce qui n'a pas lieu. Par conséquent, le rayon émergent EO ne sort pas parallèlement au rayon incident SI, et il y a déviation sans décomposition sensible.

Les lentilles achromatiques se forment de deux lentilles de substances inégalement dispersives : l'une, A, en flint, est concave-convexe divergente (fig. 301); l'autre, B, en crown-glass, est bi-convexe, et une de ses faces peut coïncider exactement avec la face concave de la première. Avec les lentilles comme avec les prismes, il faudrait sept verres pour obtenir l'achromatisme parfait ; mais deux suffisent dans tous les instruments d'optique, et on leur donne la courbure nécessaire pour achromatiser les rayons rouges et les rayons jaunes.

*** 461. Absorption de la lumière par les milieux transparents.** — On ne connaît pas de substance d'une transparence parfaite. Le verre, l'eau, l'air même, éteignent graduellement la lumière qui les traverse, et, sous une épaisseur suffisante, ces milieux peuvent l'affaiblir assez pour qu'elle n'agisse plus sur la rétine. On observe, en effet, qu'un grand nombre d'étoiles qui ne sont pas visibles, même par le ciel le plus pur, quand on est dans les plaines, le deviennent quand on s'élève sur les hautes montagnes.

Cette perte graduelle qu'éprouve la lumière en traversant les milieux diaphanes se nomme *absorption;* elle a pour cause la réflexion que subit la lumière sur les molécules des corps transparents. Si tous les rayons simples étaient également transmissibles à travers les milieux diaphanes, ceux-ci seraient incolores. Or, il n'en est jamais ainsi : ce qui montre que, comme les corps diathermanes ne se laissent pas traverser également par les différents rayons calorifiques (362), de même les corps diaphanes laissent passer plus facilement certains rayons lumineux que d'autres. Le milieu prend alors la couleur pour laquelle il est le plus diaphane. C'est pour cette raison que, sous une grande épaisseur, l'air paraît bleu; une lame de verre épaisse est verte. Le verre coloré en rouge par le protoxyde de cuivre ne laisse passer que les rayons rouges, et absorbe tous les autres, même sous une petite épaisseur.

C'est par un effet d'absorption que les rayons du soleil sont moins intenses quand cet astre est à l'horizon que lorsqu'il est au zénith, car l'épaisseur de l'atmosphère est alors bien plus considérable.

CHAPITRE V.

INSTRUMENTS D'OPTIQUE.

462. Divers instruments d'optique. — On nomme *instruments d'optique* des combinaisons de lentilles, ou de lentilles et de miroirs, qui peuvent se diviser en trois groupes, suivant les usages

auxquels ils sont destinés : 1° les instruments qui n'ont pour objet que d'amplifier les images des corps que leurs petites dimensions ne permettent pas d'observer à l'œil nu, ce sont les *microscopes;* 2° les instruments qui servent à observer les astres ou les objets très-éloignés, ce sont les *télescopes* et les *lunettes;* 3° les instruments propres à produire, sur un écran, des images réduites ou amplifiées qui peuvent être utilisées dans l'art du dessin, ou montrées à de nombreux observateurs : tels sont la *chambre claire*, la *chambre obscure*, le *daguerréotype*, la *lanterne magique*, la *fantasmagorie*, le *mégascope*, le *microscope solaire* et le *microscope photo-électrique*. Les deux premiers groupes ne donnent que des images virtuelles, et le dernier que des images réelles, excepté la *chambre claire*.

Fig. 303.

463. **Microscope simple.** — On distingue deux sortes de microscopes, le simple et le composé. Le *microscope simple* est tantôt formé d'une seule lentille convergente, tantôt de plusieurs lentilles superposées qui agissent comme une seule. On a déjà vu (445, 2°) que, dans le microscope simple, ou loupe, l'objet qu'on observe est placé entre la lentille et son foyer principal, et qu'alors l'image est virtuelle, droite et amplifiée (fig. 288).

On a donné différentes dispositions au microscope simple. La figure 103 représente celle adoptée par M. Raspail. Un support horizontal E, qui peut s'élever ou s'abaisser au moyen d'une crémaillère et d'une vis à bouton D, porte un *œilleton* noir *m*, au centre duquel est enchâssée une lentille plus ou moins convexe. Au-dessous est le *porte-objet*, qui est fixe, et sur lequel, entre deux lames de verre *b*, est placé l'objet qu'on veut observer. Comme il est nécessaire que l'objet soit fortement éclairé, on reçoit la lumière diffuse de l'atmosphère sur un réflecteur concave de verre M, qu'on incline de manière que les rayons réfléchis viennent tomber sur l'objet. Pour se servir de ce microscope, on place l'œil très-près de la lentille, qu'on abaisse vers l'objet ou qu'on élève jusqu'à

ce qu'on trouve la position où l'image apparaît avec le plus de netteté.

Des lentilles de rechange permettent de varier le grossissement, mais dans de certaines limites, si l'on veut conserver à l'image toute sa netteté : avec le microscope simple, on obtient un grossissement très-net jusqu'à 120 fois en diamètre. Le grossissement peut se déterminer par le calcul (450), ou bien par l'expérience, à l'aide du micromètre qui sera bientôt décrit (465).

464. **Microscope composé.** — Le *microscope composé*, réduit à son plus grand degré de simplicité, est formé de deux verres len-

Fig. 304.

ticulaires convergents, l'un à court foyer, nommé *objectif* parce qu'il est tourné vers l'objet; l'autre, qui est moins convergent, se nomme *oculaire* parce qu'il est près de l'œil de l'observateur.

La figure 304 représente la marche des rayons lumineux et la formation de l'image dans le microscope composé, réduit à deux verres. Un objet AB étant placé très-près du foyer principal de l'objectif M, mais un peu au delà par rapport à ce verre, une image *ab* réelle, renversée et très-amplifiée, va se former de l'autre côté de l'objectif (445, 1°). Or, la distance des deux verres M et N est telle que le lieu de l'image *ab* se trouve entre l'oculaire N et son foyer F. Il résulte de là que pour l'œil placé en E, qui regarde cette image avec l'oculaire, ce dernier verre produit l'effet du microscope simple, ou loupe (445, 2°), et substitue à l'image *ab* une seconde image *a'b'*, qui est virtuelle et amplifiée de nouveau. Cette deuxième image, droite par rapport à la première, est renversée par rapport à l'objet. On peut donc dire, en dernière analyse, que le microscope composé n'est autre chose qu'un microscope simple appliqué, non plus à l'objet, mais à son image déjà amplifiée par une première lentille.

*465. **Grossissement, micromètre.** — On nomme *grossissement*, dans tout instrument d'optique, le rapport de la grandeur absolue de l'image à celle de l'objet. Le grossissement, dans le microscope

composé, est le produit des grossissements respectifs de l'objectif et de l'oculaire : c'est-à-dire que si le premier de ces verres grossit 20 fois et l'autre 10, le grossissement définitif est 200. Le grossissement dépend du plus ou moins de convexité de l'objectif et de l'oculaire, ainsi que de la distance de ces deux verres combinée avec celle de l'objet à l'objectif. Il a été porté jusqu'à 1500 en diamètre, et même au delà ; mais alors l'image perd en clarté ce qu'elle gagne en étendue. Pour obtenir des images nettes et bien éclairées, le grossissement ne doit pas dépasser 500 à 600 en diamètre, ce qui donne, en surface, une image 250 à 360 mille fois plus grande que l'objet.

Le grossissement se mesure expérimentalement au moyen du *micromètre* ; on nomme ainsi une petite lame de verre sur laquelle sont tracés, au diamant, des traits parallèles, distants les uns des autres de $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{100}$ de millimètre. Le micromètre se place au-devant de l'objectif; puis, au lieu de recevoir directement dans l'œil les rayons qui émergent de l'oculaire O, on les reçoit sur une lame de verre à faces parallèles A (fig. 305), inclinée de 45 degrés, et on place l'œil au-dessus, de manière à voir l'image des traits du micromètre se former, par réflexion, sur une échelle divisée en millimètres, qui est tracée sur un écran E. Comptant alors le nombre de divisions de l'échelle qui correspond à un certain nombre de traits de l'image, on en déduit le grossissement. Par exemple, si l'image occupe, sur l'échelle, 45 millimètres et comprend 15 traits du micromètre, en supposant que l'intervalle de ceux-ci soit de $\frac{1}{100}$ de millimètre, la grandeur absolue de l'objet sera de $\frac{15}{100}$ de millimètres ; et celle de l'image étant de 45 millimètres, le grossissement sera le quotient de 45 par $\frac{15}{100}$, ou 300. Dans cette expérience, l'œil doit être écarté de l'écran E d'une distance égale à celle de la vue distincte, distance qui varie d'un observateur à un autre, mais qui, en moyenne, est de 25 à 30 centimètres. Le grossissement du microscope se détermine aussi à l'aide de la chambre claire qui sera décrite plus tard (473).

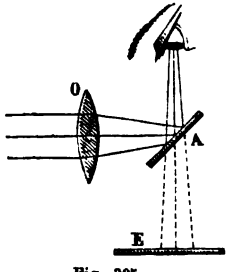


Fig. 305.

Une fois le grossissement d'un microscope connu, il est facile d'en déduire la grosseur absolue des objets placés au-devant de l'objectif. En effet, le grossissement étant le quotient de la grandeur

de l'image par la grandeur de l'objet, il s'ensuit que pour avoir la grandeur de ce dernier, il n'y a qu'à diviser la grandeur de l'image par le grossissement; c'est ainsi qu'on peut trouver, par exemple, le diamètre des globules du sang, et, en général, de tous les objets microscopiques.

466. **Microscope composé d'Amici.** — Nous n'avons fait connaître ci-dessus (464) que le principe du microscope composé; il nous

Fig. 306 (h = 83).

reste à décrire les principaux accessoires de cet appareil. Inventé vers 1620, il a reçu successivement de nombreux perfectionnements. Les plus importants ne datent que d'une trentaine d'années, et sont dus principalement à M. Amici, en Italie, et à M. Ch. Chevalier, en France.

La figure 306 représente, dans ses parties essentielles, le microscope connu sous le nom de *microscope d'Amici*, ou *microscope de Ch. Chevalier*. Dans les anciens microscopes, le tube H était toujours vertical et les lentilles n'étaient pas achromatiques. C'est M. Amici qui, le premier, adopta une disposition qui permet de placer le tube horizontal ou vertical, à volonté, et c'est M. Ch. Chevalier qui, le premier, en 1823, appliqua les lentilles achromatiques au microscope. Notre dessin représente le microscope dans la position horizontale, qui, en général, fatigue moins la vue; mais il peut aussi se placer verticalement. Pour cela, le tube coudé G s'enlève, et le grand tube H, qui porte l'oculaire, se monte à sa place sur l'objectif E. Enfin, on peut encore donner au microscope une position inclinée. A cet effet, on retire un boulon *m*, qui fixe l'appareil à sa partie inférieure, et on fait mouvoir tout le système sur une charnière *a*, qui lie le microscope à une colonne cylindrique qui lui sert de support.

Sur une tige rectangulaire parallèle à cette colonne est le *porte-objet* B. Celui-ci peut s'élever ou s'abaisser au moyen d'un petit pignon qui engrène dans une crémaillère, et qu'on fait marcher à l'aide d'un bouton D. L'objet *o* qu'on veut observer est placé entre deux lames de verre C, posées sur le porte-objet. Un réflecteur concave M, de verre, reçoit la lumière diffuse de l'atmosphère et la réfléchit sur l'objet, qui se trouve ainsi fortement éclairé, condition indispensable à cause du grossissement. Le porte-objet est percé, à son centre, d'une ouverture qu'on aperçoit au travers des lames C, et qui laisse passer la lumière renvoyée par le réflecteur

La figure 307 montre la position des verres et la marche des rayons dans le microscope. L'objectif E est formé d'une, de deux ou de trois lentilles achromatiques, comme celle représentée en M, dont les distances focales principales sont de 8 à 10 millimètres. L'oculaire est formé de deux lentilles plans-convexes *m* et *n*, ces lentilles étant achromatiques ou non achromatiques. Quant à la marche de la lumière, elle est facile à suivre. Les rayons lumineux, après s'être réfléchis sur le miroir M, viennent concourir vers l'objet *o*, et de là se dirigent vers l'objectif E. Après l'avoir traversé, ils rencontrent un prisme rectangle *p*, de cristal, sur l'hypoténuse duquel ils subissent la réflexion totale (430). Prenant alors la direction du tube AB, les rayons lumineux vont tomber sur la lentille *n*, et forment, au delà, une image *bc* réelle et amplifiée de l'objet. La dernière lentille *m* agit ensuite comme microscope simple pour

substituer à cette première image une seconde image virtuelle et encore amplifiée *b'c'*, comme le montre la figure.

La lentille intermédiaire *n*, nommée *oculaire de Campani*, a pour objet de rassembler les rayons trop obliques qui ne tomberaient pas sur l'oculaire *m*. Elle agrandit le *champ* du microscope en rendant l'image plus petite et plus nette. Ce verre sert aussi à corriger le défaut d'achromatisme que présente plus ou moins l'ob-

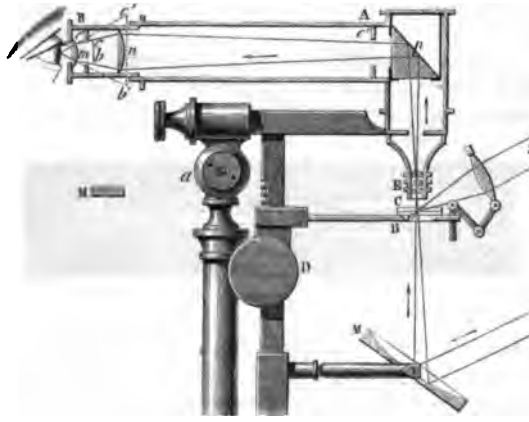


Fig. 307.

jectif. Quant à l'aberration de sphéricité, elle est corrigée par des diaphragmes *e* et *e'*, qui interceptent les rayons qui tendent à traverser les lentilles trop près des bords. Pour éteindre toute réflexion intérieure qui pourrait nuire à la netteté des images, les parois du tube sont noircies intérieurement.

Quant au mode d'éclairage du microscope, il varie selon que l'objet est transparent ou opaque. Dans le premier cas, on éclaire l'objet, comme ci-dessus, au moyen d'un réflecteur placé au-dessous du porte-objet; dans le second, on fait usage d'une lentille, soutenue par le porte-objet, et qui concentre les rayons S sur l'objet.

Enfin, l'appareil possède plusieurs oculaires et objectifs de rechange, ce qui permet d'augmenter ou de diminuer le grossissement. On obtient aussi un grossissement plus faible en supprimant une des lentilles de l'objectif et même deux.

Le microscope a été la source des découvertes les plus curieuses

en botanique, en zoologie, en physiologie. Des animaux, dont l'existence était restée jusqu'alors inconnue, ont été observés dans le vinaigre, dans la pâte de farine, dans les fruits secs, dans certains fromages; la circulation et les globules du sang sont devenus visibles. Le microscope offre aussi de nombreuses applications dans l'industrie. Par exemple, il donne les moyens de reconnaître les différentes espèces de fécules, les falsifications trop souvent introduites dans les farines, dans les chocolats, etc.; il permet encore de constater dans les étoffes la présence du coton, de la laine, de la soie.

467. **Lunette astronomique.** — La *lunette astronomique* est destinée à l'observation des astres; elle se compose, de même que le microscope, d'un objectif et d'un oculaire convergents. L'objectif

Fig. 308.

M (fig. 308) donne de l'astre qu'on regarde une image renversée *ab*, placée entre l'oculaire N et son foyer principal, et cet oculaire, qui fait l'effet d'une loupe, donne ensuite une image *a'b'* virtuelle, droite et très-amplifiée de l'image *ab*. La lunette astronomique a, comme on voit, assez d'analogie avec le microscope; mais ces instruments présentent cette différence que, dans le dernier, l'objet étant très-près de l'objectif, l'image se forme beaucoup au delà du foyer principal et est très-amplifiée (445, 1°), en sorte qu'il y a grossissement par l'objectif et par l'oculaire, tandis que dans la lunette astronomique, l'astre qu'on regarde étant très-éloigné, les rayons incidents sont parallèles, et l'image va se former au foyer principal de l'objectif beaucoup plus petite que l'objet. Il ne peut donc y avoir grossissement que par l'oculaire; c'est pourquoi ce verre doit être très-convergent.

La figure 309 représente une lunette astronomique montée sur pied, dont le dessin a été pris dans les ateliers de MM. Lerebours et Secrétan. Au-dessus est une petite lunette qu'on nomme *chercheur*. Les lunettes d'un grand pouvoir amplifiant, ayant peu de champ, ne sont pas d'un usage commode pour chercher un astre, c'est pourquoi on regarde d'abord avec le chercheur, dont le champ

est plus grand, c'est-à-dire embrasse une plus grande étendue du ciel, puis ensuite on observe avec la lunette.

Le calcul fait voir que, dans la lunette astronomique, le grossissement est sensiblement égal à $\frac{CF}{OF}$ (fig. 308), F étant le foyer de l'objectif M, et pouvant être supposé coïncider approximativement

Fig. 309.

avec le foyer de l'oculaire N, d'où l'on conclut que le grossissement est d'autant plus considérable que l'objectif est moins convergent et que l'oculaire l'est davantage. Dans une bonne lunette, le grossissement ne dépasse pas 1000 à 1200.

Quand la lunette astronomique est employée à viser les astres pour mesurer avec précision, par exemple, leur distance zénithale, leur ascension droite, ou leur passage au méridien, on lui ajoute un *réticule*. On nomme ainsi deux fils très-fins de métal ou de soie, tendus en croix sur une ouverture circulaire pratiquée dans une petite plaque métallique (fig. 310). Le réticule doit se placer au lieu même où se produit l'image renversée donnée par l'objectif, et le point de croisement des fils

Fig. 310.

doit se trouver sur l'axe optique même de la lunette, qui devient ainsi la *ligne de visée*.

468. **Lunette terrestre.** — La *lunette terrestre*, ou *longue-vue*, ne diffère de la lunette astronomique que parce que les images sont redressées. Ce redressement s'obtient à l'aide de deux verres convergents P et Q (fig. 311), placés entre l'objectif M et l'oculaire R. L'objet étant supposé en AB, à une plus grande distance que ne peut le présenter le dessin, son image va se former, renversée et très-petite, en *ba*, de l'autre côté de l'objectif. Or, la seconde lentille P est à une distance telle que son foyer principal coïncide avec l'image *ab*; d'où il résulte que les rayons lumineux qui passent en *b*, par exemple, prennent, après avoir traversé la lentille P, une direction parallèle à l'axe secondaire *b*O (441, 2°, et 444). De même, les rayons qui passent en *a* prennent une direction parallèle à l'axe *a*O. Après s'être croisés en H, ces divers rayons traversent une troisième lentille Q dont le foyer principal coïncide avec le point H.

Fig. 311.

Le faisceau B*b*H va donc concourir en *b'* sur un axe secondaire O*b* parallèle à sa direction (444); le faisceau A*a*H allant de même concourir en *a'*, il se produit en *a'b'* une image redressée de l'objet AB. C'est cette image qu'on regarde, de même que dans la lunette astronomique, avec un oculaire convergent R, placé de manière qu'il se comporte comme une loupe, c'est-à-dire que sa distance à l'image *a'b'* soit moindre que sa distance focale principale; d'où il résulte qu'il donne en *a''b''* une image virtuelle, droite et amplifiée de l'image *a'b'*. Les lentilles P et Q, qui ne servent qu'à redresser l'image, sont fixées dans un tube de cuivre, à une distance constante et égale à la somme de leurs distances focales principales. Quant à l'objectif M, il est mobile dans un tube, et peut s'approcher ou s'écarter de la lentille P, de manière que l'image *ab* vienne toujours se former au foyer de cette lentille, quelle que soit la distance de l'objet qu'on regarde. La distance de la lentille R peut aussi varier de manière que l'image *a''b''* se fasse à la distance de la vue distincte (489).

La lunette terrestre peut servir comme lunette astronomique;

mais il faut pour cela un oculaire de rechange, celui-ci devant être plus grossissant dans la dernière lunette que dans la première. Toutefois, les astronomes préfèrent la lunette à deux verres, parce qu'elle absorbe moins de lumière.

Dans la lunette terrestre, le grossissement est le même que dans la lunette astronomique, en supposant, toutefois, que les verres redresseurs P et Q sont de même convexité.

* 469. **Oculaires.** — Jusqu'ici, pour simplifier la construction des images, nous avons généralement supposé que l'oculaire était formé d'un seul verre convergent, c'est ce qui a eu lieu dans les figures 304, 308 et 311. Or, il n'en est jamais ainsi, ni dans les microscopes, ni dans les lunettes, parce qu'avec un oculaire simple, les aberrations de sphéricité (448) et de réfrangibilité (459) sont considérables. De là, la nécessité de former les oculaires de plusieurs lentilles. D'après le nombre et la disposition de celles-ci, on distingue trois principales sortes d'oculaires : l'oculaire de Campani, celui de Ramsden et celui de Dollong.

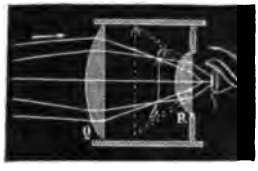


Fig. 312.

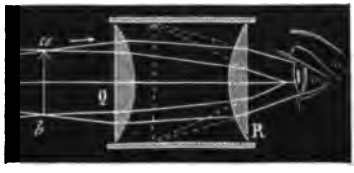


Fig. 313.

Oculaire de Campani. — L'oculaire de Campani, représenté dans la figure 312, se compose de deux verres plans-convexes, dont les faces planes sont tournées vers l'œil. Le premier verre Q reçoit les rayons qui sortent de l'objectif, et concourt avec lui pour donner en *ab* une image réelle et renversée de l'objet placé au delà de l'objectif. L'œil regarde ensuite cette image avec le verre R qui fait l'office d'une loupe.

L'oculaire de Campani est employé dans les microscopes et dans les lunettes astronomiques, quand elles sont sans réticule, c'est-à-dire lorsqu'elles ne sont employées que comme lunettes d'observation, et non comme lunettes de passage, ou lunettes murales. Dans cet oculaire, la distance focale de la lentille R égale un tiers de celle de la lentille Q, et la distance des deux lentilles Q et R égale la demi-somme de leurs distances focales.

Oculaire de Ramsden. — L'oculaire de Ramsden, représenté dans la figure 313, se compose de deux verres plans-convexes, dont les convexités se regardent. L'image réelle et renversée *ab*, donnée par l'objectif, se forme ici en avant de la lentille Q, et les deux verres Q et R agissent ensemble pour faire loupe. Les distances focales des deux lentilles sont égales, et elles sont écartées l'une de l'autre d'un intervalle égal aux deux tiers de leurs distances focales.

L'oculaire de Ramsden est employé dans les lunettes astronomiques munies d'un réticule.

Oculaire de Dollong. — Dans les lunettes terrestres, ou longues-vues, l'image devant être droite, les oculaires de Campani et de Ramsden ne peuvent être employées, car on a vu ci-dessus qu'ils donnent toujours des images renversées. On obtient alors le

redressement des images et en même temps leur achromatisme, au moyen d'un oculaire quadruple attribué à Dollong.

Cet oculaire, représenté dans la figure 314, se compose de quatre verres plans-convexes. Les deux premiers Q et R tournent leurs faces planes vers l'objectif, les deux autres S et T vers l'œil. *ab* étant l'image réelle et renversée donnée par l'objectif, les lentilles Q, R et S concourent pour donner de cette première image une image *a'b'* réelle et droite, que l'œil regarde ensuite avec la loupe T. C'est le troisième verre S, qui, en se combinant avec la lentille R, contribue surtout à atténuer les aberrations de réfrangibilité et de sphéricité, en rendant les faisceaux moins divergents.

Un habile opticien, M. Secrétan, est arrivé à construire des lunettes terrestres d'une grande perfection, en achromatisant, outre l'objectif, les lentilles R et T, qui sont celles sur lesquelles les faisceaux incidents se présentent avec un plus grand épanouis-

Fig. 314.

sement. Les faisceaux incidents ne rencontrant les lentilles Q et S qu'avec un très-faible épanouissement, on peut, sans inconvénient, ne pas les achromatiser.

Quant à la disposition des lentilles Q, R, S, T entre elles, et au rapport de leurs distances focales, M. Secrétan a adopté la règle empirique suivante :

En représentant par q, r, s, t, les distances focales respectives de ces lentilles, par d la distance de Q à R, par d' celle de R à S, par d'' celle de S à T, il choisit pour les lentilles Q, R, S, T, des verres dont les distances focales soient entre elles respectivement comme les nombres 10, 11, 12 et 9, et il prend ensuite $d = \frac{2}{3}(q + r)$, $d' = \frac{1}{2}(q + r + s + t)$, et $d'' = \frac{2}{3}(s + t)$.

Par cette combinaison, M. Secrétan obtient des longues-vues remarquables par la grandeur du champ, par leur faible longueur et par la pureté des images.

470. **Lunette de Galilée.** — La *lunette de Galilée* ou *lunette de spectacle*, est la plus simple des lunettes, car elle ne se compose que de deux verres, un objectif convergent M et un oculaire divergent R (fig. 315), et donne immédiatement une image redressée.

L'objet étant représenté par la droite AB, son image tend à aller se former en *ba*, renversée, réelle et plus petite; mais en traversant l'oculaire R, les rayons émis des points A et B se réfractent en s'écartant respectivement des axes secondaires *b*O' et *a*O', qui correspondent aux points *b* et *a* de l'image. Il en résulte que ces rayons, prolongés en sens contraire de leur direction, vont concourir sur ces axes en *a'* et en *b'*; l'œil qui les reçoit voit donc en *a'b'* une image droite et amplifiée qui paraît plus rapprochée parce qu'elle est

vue sous un angle $a'O'b'$ plus grand que l'angle AO'B sous lequel est vu l'objet. Quant au grossissement, qui est égal au rapport de l'angle $a'O'b'$ à l'angle AO'B, il n'est ordinairement que de 2 ou 3.

La distance de l'oculaire R à l'image ab est sensiblement égale à la distance focale principale de cet oculaire, d'où il résulte que l'écartement des deux verres est la différence de leurs distances focales respectives, et, par conséquent, que la lunette de Galilée est très-courte et très-portative; elle a l'avantage de faire voir les objets dans leur véritable position, et, de plus, n'ayant que deux verres,

Fig. 315.

elle absorbe peu de lumière; mais, à cause de la divergence des rayons émergents, elle a peu de champ, et il est nécessaire, pour en faire usage, de placer l'œil très-près de l'oculaire. Celui-ci peut s'approcher ou s'écarter de l'objectif, de manière que l'image $a'b'$ se forme toujours à la distance de la vue distincte.

La lunette de spectacle, ou *jumelle*, est la même que celle que nous venons de décrire; seulement elle est double, afin de former une image dans chaque œil, ce qui augmente l'éclat.

C'est la lunette de Galilée qui a été la première dirigée vers les astres. C'est avec elle que cet illustre astronome découvrit les montagnes de la lune, les satellites de Jupiter et les taches du soleil.

L'époque de l'invention des lunettes n'est pas connue. Les uns en attribuent la découverte à Roger Bacon, dans le treizième siècle; les autres à J.-B. Porta, à la fin du seizième; quelques-uns, enfin, à Jacques Métius, Hollandais, qui aurait trouvé par hasard, vers 1609, qu'en combinant deux verres, l'un concave, l'autre convexe, on voyait les objets plus grands et plus rapprochés.

471. **Télescopes.** — Les *télescopes* sont des instruments qui servent à voir les objets éloignés, et particulièrement les astres. La lunette astronomique et la lunette de Galilée sont donc des télescopes. Elles ont, en effet, d'abord porté ce nom, et se désignaient sous celui de *télescopes par réfraction* ou *télescopes dioptriques;* mais aujourd'hui on entend par télescopes des appareils dans lesquels la réflexion est utilisée, en même temps que la réfraction,

au moyen de miroirs et de lentilles, pour montrer les objets éloignés. On a construit plusieurs sortes de télescopes, dont les plus connus sont ceux de Grégory, de Newton et d'Herschell.

1° *Télescope de Grégory.* — La figure 316 represente le télescope de Grégory, monté sur un pied autour duquel il peut tourner et s'incliner plus ou moins ; la figure 317 en donne une coupe lon-

Fig. 316 (h = 1m,20).

gitudinale. Ce télescope, qui fut inventé vers 1650, se compose d'un long tube de cuivre; l'un des bouts est fermé par un grand miroir concave M, de métal, percé, à son centre, d'une ouverture circulaire dans laquelle passent les rayons qui se rendent à l'oculaire. Près de l'autre extrémité du tube est un second miroir concave N, aussi en métal, un peu plus large que l'ouverture centrale du grand miroir, et d'un rayon de courbure beaucoup plus petit que lui. Les axes de ces miroirs coïncident avec celui du tube. Le centre de courbure du grand étant en O et son foyer en *ab*, les rayons tels que SA, émis par l'astre, se réfléchissent sur ce miroir et viennent former en *ab* une image renversée et très-petite de l'astre. Or, la distance des miroirs et leur courbure respectives sont telles, que le lieu de cette image se trouve entre le centre *o* et le foyer *f* du petit miroir : d'où

il résulte que les rayons, après s'être réfléchis une seconde fois sur le miroir N, vont former en $a'b'$ une image amplifiée et renversée de ab (page 387, réciproque), et, par conséquent, droite par rapport à l'astre. Enfin, on regarde cette image avec un oculaire P, à un ou à deux verres, qui a pour objet de l'amplifier de nouveau, et qui la fait voir en $a''b''$.

Les objets qu'on observe n'étant pas toujours placés à la même distance, le foyer du grand miroir, et, par suite, celui du petit, peuvent varier de position. En outre, la distance de la vue distincte

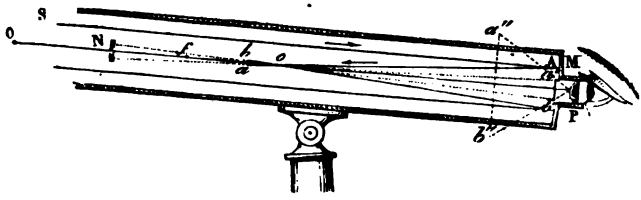


Fig. 317.

n'étant pas la même pour tous les yeux, l'image $a''b''$ doit pouvoir être placée à des distances différentes. Pour tenir compte de ces variations, il est nécessaire d'éloigner ou d'approcher le petit miroir du grand; pour cela, au moyen d'un bouton A (fig. 316), on fait tourner une tringle qui fait mouvoir, à l'aide d'un pas de vis, une pièce B à laquelle est fixé le petit miroir.

2° *Télescope de Newton.* — Le télescope de Newton diffère peu de celui de Grégory; seulement, le grand miroir n'est plus percé, et le petit miroir sur lequel il renvoie la lumière est incliné latéralement vers un oculaire placé sur le côté du tube du télescope. La difficulté de construction que présentent les miroirs métalliques avait fait abandonner depuis longtemps les télescopes de Grégory et de Newton, lorsque M. Foucault est parvenu à argenter les miroirs de verre avec une grande perfection et sans leur faire rien perdre de leur degré de poli; l'habile physicien a de suite pensé à en faire l'application au télescope de Newton, qu'il remet ainsi en usage aujourd'hui.

La figure 318 représente une coupe horizontale d'un télescope de Newton, construit tout récemment par M. Froment pour l'École polytechnique. Le miroir M est de verre argenté sur sa face concave, c'est-à-dire sur celle qui reçoit la lumière. Les rayons réfléchis par ce miroir vont tomber sur un prisme rectangle mn, qui

remplace le petit miroir plan incliné à 45 degrés sur l'axe du télescope, qui entrait dans l'ancien télescope de Newton. Subissant la réflexion totale sur l'hypoténuse du prisme (430), les rayons vont former en *ab* une image très-petite de l'astre vers lequel est dirigé l'instrument. On regarde cette image avec un véritable mi-

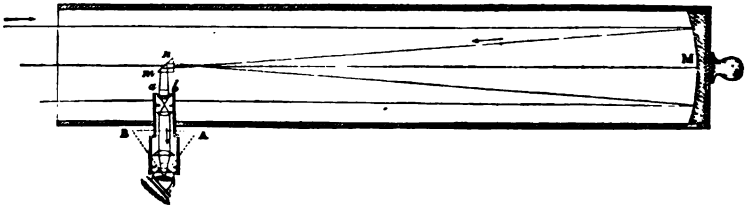


Fig. 318.

croscope placé sur le côté de l'instrument, et donnant un grossissement qui s'élève de 50 à 800, en variant les verres.

Dans cet instrument, c'est le grand miroir qui fait l'office d'objectif, mais évidemment sans aucune aberration de réfrangibilité (459). Quant aux aberrations de sphéricité, M. Foucault les corrige par des retouches successives faites au miroir, dont la surface, d'abord sphérique, se transforme successivement en celle d'un ellipsoïde, et enfin d'un paraboloïde. C'est en opérant ainsi que MM. Froment et Secrétan viennent de construire un télescope dont le miroir a 33 centimètres de diamètre et $2^m,25$ de longueur

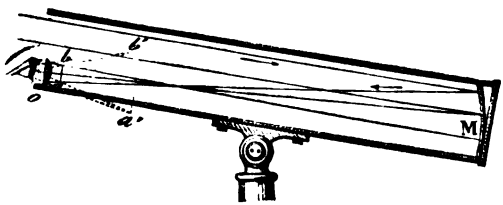


Fig. 319.

focale, et d'un pouvoir optique tel, qu'on a pu, avec cet instrument, dédoubler l'étoile bleue de γ d'Andromède, résultat qui n'avait pu être obtenu jusqu'ici que par M. Struve, à l'aide de la grande lunette de Pulkowa.

* 3° *Télescope d'Herschell.* — Le télescope d'Herschell, attribué aussi à Lemaire, n'est formé que d'un seul réflecteur concave M

(fig. 319) et d'un oculaire *o*. Le réflecteur est incliné sur l'axe de manière que l'image de l'astre qu'on observe vienne se former en *ab*, sur le côté du télescope, près de l'oculaire *o*, qui donne ensuite l'image amplifiée *a'b'*. Dans ce télescope, les rayons n'éprouvant qu'une seule réflexion, la perte de lumière est moindre que dans les deux précédents, et l'image est plus éclairée. Quant au grossissement, il est, comme dans le précédent, le rapport de la distance focale principale du miroir à celle de l'oculaire.

Les télescopes à réflexion furent adoptés à une époque où on ne savait pas corriger, dans les objectifs, l'aberration de réfrangibilité; depuis qu'on construit des objectifs achromatiques, on fait généralement usage de télescopes dioptriques, c'est-à-dire uniquement à réfraction, comme les lunettes décrites ci-dessus (467, 468 et 470).

472. **Chambre obscure.** — La *chambre obscure*, ainsi que son nom l'indique, est une chambre fermée de toutes parts à la lumière, à l'exception d'une petite ouverture par laquelle entrent les rayons lumineux, comme le montre la figure 230 (page 366). Alors tous les objets extérieurs, dont les rayons peuvent atteindre l'ouverture, vont se peindre sur le mur opposé, avec des dimensions réduites et avec leurs couleurs naturelles; mais les images sont renversées.

C'est Porta, physicien napolitain, qui fit connaître, en 1560, le phénomène produit par un faisceau lumineux qui pénètre dans une chambre obscure. Peu de temps après, le même physicien observa que si, dans l'ouverture de la chambre obscure, on fixe une lentille bi-convexe, et qu'on place au foyer de celle-ci un écran blanc, l'image qui s'y produit gagne considérablement en éclat, en netteté, en coloris, et est admirable de vérité. Ces images sont d'autant mieux éclairées que la lentille est plus grande, et leurs dimensions augmentent avec la distance focale.

Pour utiliser la chambre noire, dans l'art du dessin, on lui a donné diverses formes, de manière à la rendre portative et à redresser facilement les images. La figure 320 représente la *chambre noire à tirage*. Elle consiste en une boîte rectangulaire, de bois, dans laquelle les rayons lumineux R pénètrent à travers une lentille B, et tendent à aller former une image sur la paroi opposée O, qui doit être éloignée de la lentille B d'une longueur égale à sa distance focale. Mais les rayons, rencontrant un miroir de verre M incliné de 45 degrés, changent de direction, et l'image va se former sur un écran de verre dépoli N. En plaçant sur cet écran une feuille de papier à calque, on peut prendre avec fidélité, au crayon, les contours de l'image. Une planchette de bois A sert à inter-

cepter la lumière qui éclairerait l'image et empêcherait de la voir.

La boîte est formée de deux parties qui peuvent glisser à coulisse l'une dans l'autre, de manière que la partie antérieure se tirant plus ou moins, l'image aille se former, après la réflexion, exacte-

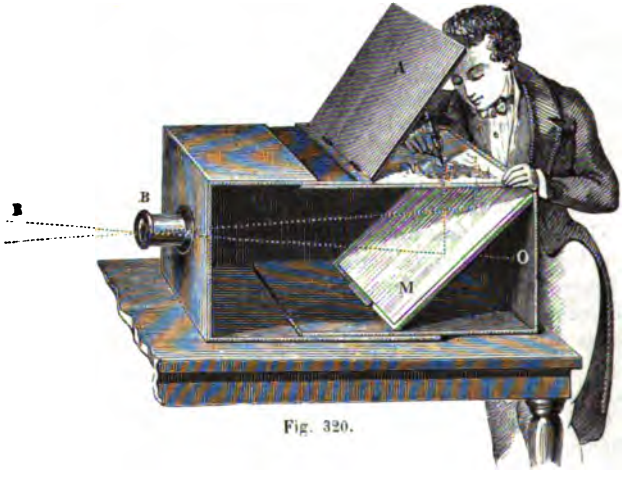


Fig. 320.

ment sur l'écran N, quelle que soit la distance de l'objet dont on veut prendre le dessin.

La figure 321 représente une autre espèce de chambre noire connue sous le nom de *chambre noire à prisme* Dans un étui de cuivre A est un prisme triangulaire P (fig. 322), lequel tient lieu, à la fois, de lentille convergente et de miroir; pour cela, une de ses faces étant plane, les autres ont une courbure telle, que par leurs réfractions combinées, à l'entrée et à la sortie des rayons, elles produisent l'effet d'un ménisque convergent C (fig. 277). Il résulte de là que les rayons émis par un objet AB, après avoir pénétré dans le prisme et éprouvé sur la face *cd* la réflexion totale, vont former en *ab* une image réelle de AB.

Cela posé, dans la figure 321, la tablette B correspondant au foyer du prisme contenu dans l'étui A, l'image des objets extérieurs vient se former sur une feuille de papier placée sur cette tablette. Le tout est enveloppé d'un rideau noir, et en se plaçant dessous, le dessinateur est complétement dans l'obscurité. La tablette s'enlève a

volonté et les pieds se ploient à l'aide de charnières, ce qui rend tout à fait portatif cet appareil dû à M. Ch. Chevalier.

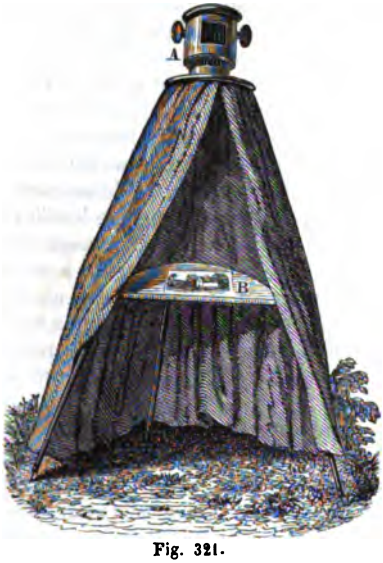


Fig. 321.

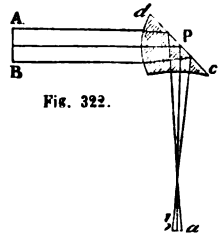


Fig. 322.

* 473. **Chambre claire.** — La *chambre claire* ou *camera lucida*, est un petit appareil dont on se sert pour obtenir une image fidèle d'un paysage, d'un monument ou de tout autre objet. C'est Wollaston qui imagina le premier appareil de ce genre en 1804. La chambre claire de ce physicien consiste en un petit prisme de verre à quatre faces, dont la figure 323 représente une section perpendiculaire aux arêtes. L'angle A est droit, l'angle C de 135 degrés, et chacun des angles B et D de 67 degrés et demi environ. Ce prisme est supporté sur un pied à tirage qui permet de le hausser ou de l'abaisser à volonté; de plus, il peut se tourner plus ou moins autour d'un axe parallèle à ses arêtes. Cela posé, la face AB étant tournée vers l'objet dont on cherche l'image, les rayons partis de cet objet tombent à peu près perpendiculaires sur cette face, y pénètrent sans réfraction sensible et viennent éprouver la réflexion totale sur la face BC; car la ligne *ab* étant normale à la face BC, on reconnaît facilement que l'angle d'incidence L*na* et l'angle B sont égaux, comme ayant leurs côtés perpendiculaires; et puisque l'angle B est de 67 degrés et demi, l'angle *nn*L est plus grand que l'angle limite du verre (430), condition nécessaire pour que la réflexion totale ait lieu. Arrivés en *o*, les rayons subissent encore la réflexion totale et sortent très-près du sommet D, suivant

une direction sensiblement perpendiculaire à la face DA, en sorte que l'œil, qui reçoit ces rayons, voit en L' l'image de l'objet L. Si l'on suit alors les contours de l'image avec un crayon, on en obtient un dessin très-exact; mais il se présente ici une difficulté assez grande, c'est de voir, en même temps, l'image et la pointe du crayon, car les rayons qui viennent de l'objet donnent une image qui est plus éloignée de l'œil que le crayon. On corrige ce défaut en interposant, entre l'œil et le prisme, une lentille I, qui donne la même convergence aux rayons venant du crayon et à ceux qui viennent de l'objet; mais encore faut-il placer l'œil très-près du bord du prisme, et de manière que l'ouverture pupillaire se trouve partagée en deux parties, dont l'une voit l'image et l'autre le crayon.

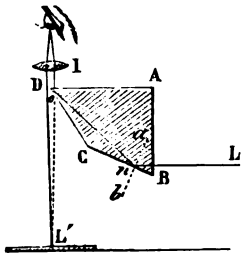


Fig. 323.

M. Ch. Chevalier a apporté d'importants perfectionnements à la chambre claire de Wollaston. Comme l'image ou le crayon cesse d'être visible distinctement lorsque la lumière qui les éclaire est trop inégale, il a adapté à l'instrument des verres colorés qui s'interposent, soit du côté de l'objet, soit du côté du crayon, et, en interceptant une partie de la lumière, rendent sa distribution plus uniforme.

M. Amici a imaginé une chambre claire qui est préférable à celle de Wollaston, parce qu'elle permet de donner à l'œil un déplacement assez étendu, sans cesser de voir l'image et le crayon, ce qui n'a pas lieu dans l'appareil qui vient d'être décrit. La chambre claire d'Amici se compose d'un prisme rectangle ABC (fig. 324), de verre, dont l'une des faces de l'angle droit est tournée vers l'objet qu'on regarde, et l'autre est perpendiculaire à une lame de verre inclinée *mn*. Les rayons LI, émis par l'objet et pénétrant dans le prisme, subissent la réflexion totale sur son grand côté, et sortent suivant la direction KH. Se réfléchissant alors partiellement sur la lame de verre, ils forment en L', pour l'œil qui les

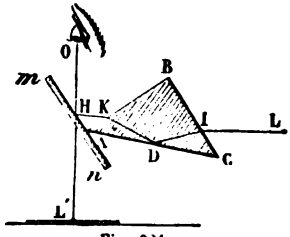


Fig. 324.

reçoit, une image virtuelle de l'objet L. L'œil, qui voit cette image, peut apercevoir très-bien, en même temps, un crayon à travers la lame de verre, ce qui permet de prendre des dessins avec une grande précision.

PHOTOGRAPHIE.

474. **Daguerréotype.** — Le *daguerréotype*, ainsi appelé du nom de son inventeur, est un appareil qui sert à fixer, sur des substances *sensibles* à la lumière, les images que forment les lentilles convergentes dans la chambre obscure (472). L'art d'obtenir ainsi les images des objets par l'action de la lumière, a reçu le nom de *photographie*. On distingue la photographie sur plaque métallique, la photographie sur papier et la photographie sur verre.

Dès 1770, le célèbre chimiste suédois Scheele avait reconnu que le chlorure d'argent, qui se conserve blanc dans l'obscurité, noircit par l'action de la lumière. A l'aide de cette propriété du chlorure d'argent, on pouvait déjà reproduire des gravures; car si, sur une feuille de papier recouverte de cette substance, on applique une gravure, et qu'on expose le tout à la lumière solaire de manière que celle-ci soit interceptée par les parties noires de la gravure, le papier chloruré n'est noirci que dans les parties qui correspondent aux clairs de la gravure, et les autres parties restent blanches. Dans la copie ainsi obtenue, les teintes sont donc renversées, c'est-à-dire que les noires sont devenues les claires, et réciproquement. Cette copie a en outre le défaut de ne pouvoir être conservée que dans l'obscurité, car, aussitôt qu'elle reste exposée à la lumière, elle noircit dans toutes ses parties et disparaît.

Il restait donc à produire des images sans inversion de clair et d'ombre, et à les fixer, c'est-à-dire à les rendre, une fois formées, insensibles à l'action de la lumière. Charles, en France, Wedgwood et Davy, en Angleterre, s'occupèrent de la solution de ce problème, qui a été résolu par Niepce et Daguerre. Le premier de ces deux physiciens, après des recherches patientes, continuées de 1814 à 1829, était parvenu à former, sur une lame de cuivre plaquée d'argent, une image inaltérable à la lumière, et dans laquelle les teintes claires ou sombres occupaient la même place que dans l'objet. Mais dans le procédé de Niepce, où la substance impressionnable était le bitume de Judée, plongé ensuite dans un mélange d'huile de lavande et de pétrole, l'action de la lumière devait se prolonger

pendant 10 à 12 heures, ce qui était tout à fait impraticable pour le portrait.

En 1829, Niepce communiqua ses procédés à Daguerre, déjà connu par l'invention du *diorama*, et qui lui-même s'occupait, depuis plusieurs années, des mêmes recherches; mais ce ne fut qu'après un travail de dix ans que Daguerre fit connaître, en 1839, la belle découverte qui eut un si grand retentissement en France et à l'étranger. Niepce, mort depuis six ans, ne put recueillir la part de gloire qui lui revenait si bien.

Le procédé de Daguerre se compose de cinq opérations principales : 1° le polissage de la plaque mince, en cuivre doublé d'argent, sur laquelle doit se former l'image; 2° le dépôt sur cette plaque de la *couche sensible*, c'est-à-dire de la substance qui la rend impressionnable à la lumière; 3° l'exposition de la plaque, dans la chambre noire, à l'action de la lumière; 4° l'exposition de la plaque aux vapeurs mercurielles qui font apparaître l'image; 5° la fixation de l'image.

Le polissage de la plaque est une opération importante d'où dépend le succès de l'épreuve. On commence avec des tampons de coton très-légèrement imprégné d'alcool et saupoudré de tripoli. On l'achève ensuite avec du rouge d'Angleterre et un polissoir en cuir. La plaque une fois polie, on l'expose sur une petite boîte rectangulaire, pendant deux minutes environ, à de la vapeur d'iode qui réagit sur l'argent de la plaque et le transforme, sous une épaisseur extrêmement faible, en iodure d'argent. On reconnaît que la plaque est convenablement iodée lorsqu'elle a pris une belle teinte jaune d'or commençant à passer au rouge sur les bords. La plaque est alors apte à recevoir l'action de la lumière, mais seulement pour prendre des vues ou des copies. Elle ne pourrait encore être employée pour portrait, parce qu'elle exige une action de la lumière de 8 à 10 minutes pour être impressionnée. Il reste donc à la soumettre à l'action de substances *accélératrices*, c'est-à-dire qui exaltent la sensibilité de la couche d'iodure et permettent à l'image de se produire seulement en quelques secondes. Ces substances sont une dissolution aqueuse de brôme, ou du brômure de chaux solide. La plaque est exposée à la vapeur de l'une de ces substances pendant 30 secondes à 1 minute environ, jusqu'à ce qu'elle ait pris une teinte aussi rouge que possible, sans passer au violet. La plaque une fois brômée, on la rapporte sur la boîte à iode, où on la laisse *exactement* la moitié du temps qu'elle y était restée la première fois.

La plaque est alors très-impressionnable à l'action de la lumière. C'est pour cette raison que les préparations que nous venons d'indiquer se font dans un lieu fort peu éclairé, et quand elles sont terminées, la plaque est renfermée dans un petit châssis en bois, où elle est recouverte, du côté argenté, par un écran de bois, à coulisse, qui peut se tirer à volonté, et, de l'autre, par un volet à charnière, qui se rabat dessus et la maintient fixe dans le châssis. Dans cet état, la plaque est portée dans une petite chambre noire

Fig. 325 (h = 28).

portative, en bois, qui est représentée dans la figure 325, et qui constitue la pièce qu'on désigne ordinairement sous le nom de daguerréotype.

Cette pièce, qui se compose d'une partie fixe C et d'une partie mobile B, est une véritable chambre noire à tirage (472). Dans un tube de cuivre A est l'objectif : c'est une lentille convergente, achromatique, qui s'avance ou se recule au moyen d'une crémaillère et d'un petit pignon qu'on fait tourner avec la main, à l'aide d'une tige à bouton D. La paroi opposée à l'objectif est formée d'un écran de verre dépoli fixé dans un cadre E, qui s'enlève à volonté. Cela posé, s'agit-il d'obtenir un portrait, on fait asseoir le modèle à 4 ou 5 mètres en avant de l'objectif, puis on tire la caisse mobile B, jusqu'à ce que l'image, qui se produit renversée sur la plaque de verre, apparaisse avec netteté, ce qui a lieu lorsque la plaque est sensiblement au foyer. On achève ensuite de mettre au foyer, en approchant ou écartant l'objectif au moyen du bouton D. Pour les portraits, on doit mettre au foyer par rapport aux yeux de

la personne qui pose, cette partie du visage étant la plus centrale.

Le foyer trouvé, sans déplacer la chambre noire, on enlève le cadre E et l'écran de verre, et on met à la place le châssis qui contient la plaque iodée; retirant enfin l'écran à coulisse qui masque la face argentée, l'image qui se formait sur le verre se forme actuellement sur la plaque. C'est alors que la lumière produit sa mystérieuse action, et qu'elle dessine, sur la plaque, une image invisible. Le temps pendant lequel doit se prolonger l'exposition de la plaque à la lumière varie avec l'objectif, avec la préparation de la couche sensible et avec l'intensité de la lumière; il peut aller de 8 à 50 secondes. Si l'exposition à la lumière a été trop prolongée, l'épreuve sera blanche; elle sera noire si l'exposition a été de trop courte durée.

Lorsqu'il est temps d'arrêter l'action de la lumière, ce qu'on ne reconnaît qu'avec une grande habitude, on abaisse l'écran à coulisse, et on retire le châssis dans lequel la plaque se trouve dans une complète obscurité, ce qui est aussi indispensable qu'avant son introduction dans la chambre noire. Si l'on regardait la plaque, en ce moment, on n'apercevrait encore aucune trace d'image; pour rendre celle-ci visible, on expose la plaque à l'action de vapeurs de mercure, en la plaçant, sous une inclinaison de 45 degrés, à la partie supérieure d'une boîte de bois disposée à cet usage, dont le fond, qui est en tôle, porte une cavité pleine de mercure. Celui-ci étant porté à une température de 60 à 75 degrés, au moyen d'une petite lampe à alcool, les vapeurs mercurielles se déposent abondamment, sous forme de gouttelettes imperceptibles, sur les parties qui ont été fortement éclairées; et, au bout de quelques minutes, il se forme un amalgame d'argent et de mercure qui donne les blancs de l'épreuve, tandis que les autres parties restent noires par l'effet même du bruni de la plaque. L'image est alors visible, et peut rester exposée à la lumière. Toutefois, la plaque est encore recouverte, surtout dans les ombres, d'une couche d'iodure d'argent, qui donne à l'épreuve une teinte rougeâtre ou violacée. On fait disparaître cette teinte en lavant la plaque dans une dissolution d'hyposulfite de soude. Mais l'image ne résiste pas à la plus légère friction, ce qui tend à prouver que l'argent et le mercure ne sont pas amalgamés.

C'est pour corriger ce défaut qu'il reste encore l'opération qui a pour but de fixer l'image; à cet effet, on lave la plaque dans une solution faible de chlorure d'or et d'hyposulfite de soude. Dans cette opération, de l'argent se dissout, tandis que de l'or se com-

bine au mercure et à l'argent de la plaque; l'amalgame de mercure et d'argent qui forme le blanc de l'épreuve augmente alors de solidité et d'éclat en se combinant à l'or, d'où résulte un remarquable accroissement d'intensité dans les clairs de l'image. C'est à M. Fizeau qu'est dû l'emploi du chlorure d'or, qui est le principal perfectionnement qu'on ait apporté à la découverte de Daguerre.

La figure 326 représente une coupe de l'*objectif*, c'est-à-dire de l'appareil qui sert à concentrer la lumière sur la plaque et à y produire l'image. Il consista d'abord en une seule lentille biconvexe achromatique; mais on ne tarda pas à adopter des objectifs à deux lentilles achromatiques, qu'on désigne sous le nom d'objectifs à verres combinés. Ils opèrent plus vite que les objectifs à un seul verre, ont une distance focale moindre, et permettent de mettre très-facilement au foyer, ce qui se fait en approchant ou en écartant la lentille B, qui est tournée vers l'objet, de la lentille A, au moyen d'une crémaillère et d'un pignon D.

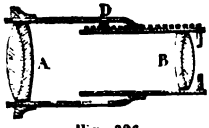


Fig 326

475. Photographie sur papier. — Dans le procédé de Daguerre, qui vient d'être décrit, les images sont immédiatement produites sur des plaques métalliques; il n'en est pas ainsi dans la photographie sur papier, qui comprend deux parties distinctes : dans la première, on obtient une image dont les teintes sont renversées, c'est-à-dire que les parties les plus claires sont devenues les plus obscures sur le papier, et réciproquement : c'est l'*image négative*. Dans la seconde partie, on se sert de la première image pour en former une seconde dont les teintes sont renversées de nouveau et se retrouvent, par conséquent, dans leur ordre naturel : c'est l'*image positive*.

L'épreuve négative peut être obtenue sur verre ou sur papier; on l'obtient généralement aujourd'hui sur verre pour les portraits, et sur papier pour les paysages.

Épreuves négatives sur verre. — On nettoie une plaque de verre en la frottant avec un tampon de linge trempé d'abord dans de la terre pourrie délayée dans de l'alcool, puis avec de l'alcool seul, et on la frotte ensuite avec une peau de daim. De la propreté de la plaque dépend en grande partie la réussite de l'épreuve.

La plaque bien nettoyée, on la pose bien horizontalement, et on verse, sur son milieu, du collodion liquide contenant une dissolution d'iodure de potassium; puis on incline la plaque dans différents sens, de manière à obtenir une couche de collodion bien

uniforme dans toute son étendue, et on l'incline enfin vers l'un de ses angles afin de laisser écouler l'excès du liquide.

Bientôt l'éther du collodion se vaporisant, celui-ci prend un aspect voilé. A ce moment, on plonge la plaque dans une dissolution contenant 1gr d'azotate d'argent pour 10gr d'eau; là l'iodure de potassium se transforme en iodure d'argent. Cette opération doit être faite dans une pièce obscure, éclairée seulement par une bougie, ou par une lampe recouverte d'un verre jaune orangé, ou simplement d'un cylindre de papier de même couleur. On laisse la plaque environ une minute dans le bain d'argent, puis on la fait égoutter; quand elle est bien sèche, on la place dans un châssis fermé, et on la porte dans la chambre noire de Daguerre (fig. 325), de la même manière qu'on l'a déjà vu pour les plaques métalliques (474). Là, sous l'influence de la lumière, l'iodure d'argent éprouve un commencement de décomposition (456, 3°), mais sans que l'image soit encore apparente, l'action n'ayant pas été assez prolongée. Pour rendre l'image visible, on plonge la plaque dans une dissolution d'acide pyrogallique avec addition d'acide acétique cristallisable, et on chauffe légèrement; partout où l'iodure a éprouvé un commencement de décomposition, il se forme un gallate d'argent qui est noir, et l'image apparaît subitement. Les parties ombrées de l'image qui n'ont pas reçu l'action de la lumière restent blanches, l'iodure d'argent n'ayant pas été décomposé. Mais comme ce sel noircirait promptement par l'action de la lumière et ferait ainsi disparaître l'image, on lave la plaque dans une dissolution d'hyposulfite de soude, qui dissout l'iodure d'argent, ce qui rend l'image inaltérable par l'action de la lumière.

Épreuves positives sur papier. — L'épreuve négative, une fois obtenue, sert à produire un nombre indéfini d'images positives. Pour cela, on la recouvre d'un papier imprégné de chlorure d'argent, et, ayant comprimé les deux feuilles entre deux lames de verre, on expose le tout à l'action de la lumière, de manière que les parties noires de l'image négative portent ombre sur le papier au chlorure d'argent. Il se reproduit alors, sur celui-ci, une copie de l'image négative, où les parties claires sont remplacées par les ombres, et réciproquement; on a donc ainsi une image positive. Il reste à la fixer, ce qu'on obtient en lavant le papier, comme ci-dessus, dans une dissolution d'hyposulfite de soude. Enfin, pour donner du ton à l'épreuve, ce qu'on appelle la *virer*, on la plonge quelques heures dans un bain de chlorure d'or, contenant un gramme de chlorure pour 1 litre d'eau.

476. **Epreuves positives sur verre.** — On obtient de jolies épreuves positives sur verre en préparant d'abord les plaques comme pour les épreuves négatives, ainsi qu'il a été dit dans le paragraphe précédent; mais l'exposition à la lumière, dans la chambre obscure, doit être moins prolongée que pour les plaques négatives, moitié environ. On les plonge ensuite dans une dissolution saturée de protosulfate de fer. L'image paraît alors subitement; mais elle est négative. Pour la rendre positive, on plonge la plaque dans un vase plein d'eau, afin d'enlever l'excès de sulfate de fer, puis on verse dessus une dissolution de cyanure de potassium, contenant 1 de cyanure pour 10 d'eau. Aussitôt l'image se dépouille complétement et devient positive. On lave alors, on vernit avec du vernis à tableau, et enfin on recouvre le tout d'une couche de bitume de Judée. C'est ensuite sur l'autre face de la lame de verre qu'on regarde l'image.

477. **Photographie sur plaques de verre albuminées.** — Les plaques de verre préparées au collodion présentent cet inconvénient qu'elles doivent être employées aussitôt leur préparation, tandis que les plaques préparées à l'albumine peuvent attendre huit jours et plus avant d'être soumises à l'action de la lumière; mais elles doivent subir cette action pendant beaucoup plus longtemps que les plaques préparées au collodion. Aussi sont-elles sans usage pour le portrait, et seulement employées à prendre des vues.

C'est à M. Niepce de Saint-Victor qu'est dû le procédé de photographie par l'albumine. Pour préparer cette substance, on bat en neige un certain nombre de blancs d'œufs, on laisse reposer, on décante, puis on ajoute 1 pour 100 d'iodure de potassium et 25 pour 100 d'eau. On a ainsi un liquide qu'on peut conserver plusieurs jours dans un flacon bien bouché.

La plaque de verre sur laquelle on veut étendre l'albumine doit être parfaitement décapée de la même manière que pour le collodion (475). Après, on chauffe la plaque légèrement pour y faire adhérer, du côté opposé à celui qui doit servir, un bout de tube en gutta-percha, qui sert de manche pour manier la plaque.

Tenant ensuite la plaque par son manche, on verse dessus une couche de liquide albumineux, préparé comme il a été dit ci-dessus; puis, prenant le manche de gutta-percha entre les deux mains, on le fait tourner rapidement, ainsi que la plaque, ce qui imprime au liquide albumineux un mouvement centrifuge qui fait accumuler sur les bords de la plaque l'excès d'albumine qu'on enlève avec une pipette.

La plaque une fois albuminée et séchée est placée pendant 1 minute dans un bain d'argent contenant 8 d'azotate d'argent et 8 d'acide acétique cristallisable pour 100 d'eau. Retirée du bain, elle peut être placée dans la chambre noire à l'état humide; lorsqu'on veut s'en servir à l'état sec, il faut la débarrasser de l'excès d'argent qu'elle contient en la lavant dans de l'eau distillée, puis la faire sécher dans l'obscurité, et alors on peut la conserver plusieurs jours avant de s'en servir.

Quand la plaque ainsi préparée a subi l'action de la lumière, dans la chambre noire, pendant 20 minutes environ, on fait apparaître l'image en plongeant la plaque dans une dissolution d'acide gallique qu'on chauffe doucement à la lampe. Quelques gouttes d'une dissolution d'azotate d'argent, ajoutées au bain d'acide gallique, hâtent notablement l'apparition de l'image et donnent plus de vigueur à ses ombres. Enfin, ayant lavé la plaque à grande eau, on fixe l'image par une immersion pendant 5 minutes dans un bain d'hyposulfite de soude, contenant 8 d'hyposulfite pour 100 d'eau.

L'image ainsi obtenue est négative et sert ensuite à donner des épreuves positives sur verre albuminé ou sur papier (475).

* 478. **Lanterne magique.** — La *lanterne magique* est un petit

Fig. 328.

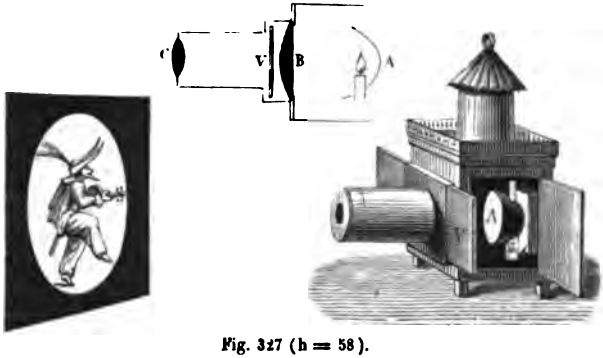


Fig. 327 (h = 58).

appareil qui sert à obtenir, sur un écran blanc, dans une chambre obscure, des images amplifiées de petits objets. Elle consiste en une boîte de fer-blanc, dans laquelle est une lampe placée au foyer d'un réflecteur concave A (fig. 327). Les rayons réfléchis par celui-ci sont reçus par une lentille convergente B (fig. 328), qui les con-

centre vers des figures diverses peintes sur une lame de verre V. Ces figures, ainsi éclairées fortement, sont placées devant une seconde lentille convergente C, à une distance un peu plus grande que la distance focale principale. Dans cette position, cette lentille produit, sur un écran convenablement éloigné, une image réelle, renversée et très-amplifiée, des objets peints sur le verre (445, 1°). Pour redresser l'image, on a soin de placer le verre peint, dans la lanterne, de manière que les dessins soient renversés.

La lanterne magique a été inventée par le père Kircher, jésuite allemand, mort à Rome en 1680.

Le grossissement fourni par la lanterne magique est le même que celui que donnent les lentilles (450); c'est-à-dire qu'il est le rapport des distances de la lentille C à l'image et à l'objet. Par conséquent, si l'image est 100 fois, 1000 fois plus éloignée de la lentille que l'objet, le grossissement est 100 ou 1000. On conçoit dès lors qu'avec une lentille à court foyer on pourra, si l'écran est suffisamment éloigné, obtenir des images extrêmement amplifiées (445, 1°).

* 479. **Microscope solaire.** — Le *microscope solaire* est une véritable lanterne magique éclairée par les rayons solaires, laquelle

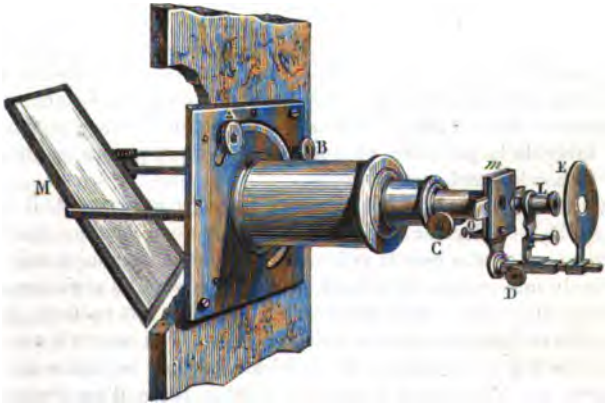


Fig. 329.

sert à obtenir des images très-amplifiées d'objets extrêmement petits. Cet appareil fonctionne dans une chambre noire; la figure 329 le représente fixé au volet de la chambre, et la figure 330 en montre les détails intérieurs.

Un miroir plan M, placé hors de la chambre obscure, reçoit les rayons solaires et les réfléchit vers une lentille convergente *l*, et de là sur une deuxième lentille *o* (fig. 330), nommée *focus*, qui les concentre en son foyer. En ce point est l'objet dont on veut avoir l'image; il est placé entre deux lames de verre, qu'on introduit entre deux lames métalliques *m*, qui les compriment entre elles par l'effet d'un ressort à boudin placé en *n*. L'objet étant alors fortement éclairé et placé très-près du foyer d'un système de trois lentilles très-convergentes *x*, celles-ci en donnent une image *ab*, renversée et

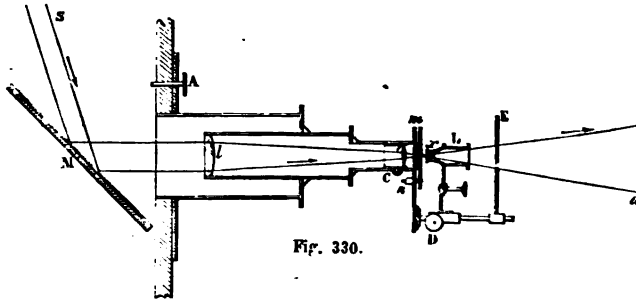


Fig. 330.

très-amplifiée, sur un mur ou sur un écran blanc convenablement éloigné. Les vis à bouton C et D servent à régler la distance des lentilles *o* et *x* à l'objet, de manière que celui-ci soit exactement au foyer de la première, et que l'image formée par les lentilles *x* corresponde exactement à l'écran.

La direction de la lumière solaire variant constamment, il faut que celle du réflecteur disposé hors du volet de la chambre obscure change aussi, afin que la réflexion se fasse constamment suivant l'axe du microscope. Le procédé le plus exact serait d'avoir recours à l'héliostat (424); mais comme cet appareil est fort coûteux, on y supplée en inclinant plus ou moins le miroir M au moyen d'une vis sans fin B et d'un pignon, et en faisant tourner ce même miroir autour de la lentille *l*, ce qui s'obtient à l'aide d'un bouton A (fig. 329), qui se meut dans une coulisse fixe et transmet au miroir un mouvement de rotation autour de l'axe de l'instrument.

Le microscope solaire a l'inconvénient de concentrer sur l'objet une chaleur trop intense qui l'altère promptement. On y remédie en interposant une couche d'eau saturée d'alun, qui, ayant un très-faible pouvoir diathermane, arrête une partie de la chaleur (358).

Le grossissement du microscope solaire peut se déterminer expérimentalement, en mettant, à la place de l'objet, une lame de verre sur laquelle sont tracées des divisions distantes de $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{100}$ de millimètre. Mesurant ensuite sur l'image l'intervalle de ces divisions, on en conclut le grossissement. Le même procédé peut être employé pour le microscope photo-électrique (480). Suivant le grossissement qu'il s'agit d'obtenir, l'objectif x est formé d'une, de deux ou de trois lentilles, qui sont toutes achromatiques.

Le microscope solaire donne le moyen de montrer à un nombreux auditoire des phénomènes très-curieux : par exemple, la circulation du sang dans la queue des têtards ou dans les pattes de grenouilles ; la cristallisation des sels et particulièrement du sel ammoniac, ou encore les animalcules qu'on observe dans le vinaigre, dans la pâte de farine, dans les eaux stagnantes, etc.

* 480. **Microscope photo-électrique.** — Le *microscope photo-électrique* n'est autre chose qu'un microscope solaire qui, au lieu d'être éclairé par le soleil, l'est par la lumière électrique. Cette lumière, par son intensité, par la fixité qu'on parvient à lui donner, et par la facilité avec laquelle on peut se la procurer à toute heure de la journée, est de beaucoup préférable à l'emploi de la lumière solaire. Nous ne décrirons ici que le microscope photo-électrique proprement dit ; la lumière électrique le sera en parlant de la pile.

Ce sont MM. Foucault et Donné qui ont imaginé le microscope photo-électrique. La figure 331 représente la disposition que M. Duboscq a donnée à cet appareil. Sur une boîte rectangulaire de cuivre jaune est fixé extérieurement un microscope solaire ABD, identique à celui qui a été décrit ci-dessus. Dans l'intérieur sont deux baguettes de charbon a et c, qui ne se touchent pas tout à fait, leur intervalle correspondant exactement à l'axe des lentilles du microscope. L'électricité d'une forte pile arrive par un fil de cuivre K au charbon a, de celui-ci passe sur le charbon c, qui, pour cela, doit d'abord être en contact avec le charbon a ; puis ensuite on les écarte un peu, l'électricité étant suffisamment conduite par le charbon vaporisé qui passe de a sur c. Enfin, du charbon c, l'électricité rejoint, par une colonne métallique o, un second fil de cuivre H qui la ramène à la pile.

Cela posé, pendant le passage de l'électricité, les extrémités des deux charbons deviennent incandescentes, et répandent une lumière du plus vif éclat qui éclaire fortement le microscope. Pour cela, on place en D, dans l'intérieur du tube, une lentille convergente dont

le foyer principal correspond à l'intervalle même des deux charbons. De la sorte, les rayons lumineux qui entrent dans les tubes D et B, sont parallèles à leur axe, et tout se passant alors comme dans le microscope solaire ordinaire, il se forme sur un écran E, plus ou

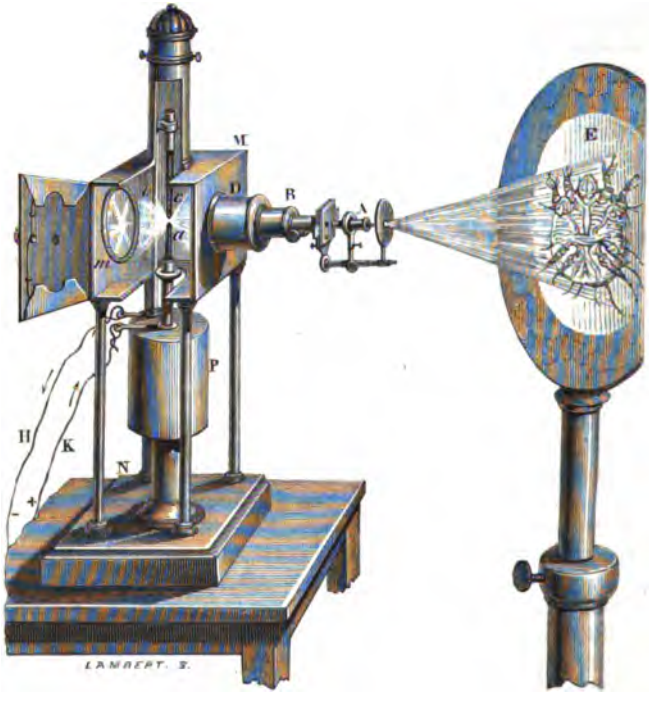


Fig. 331 (h = 0m,95).

moins éloigné, une image très-amplifiée de petits objets placés entre deux lames de verre, au bout du tube B. Dans le dessin ci-dessus, l'objet figuré sur l'écran est l'*acarus* de la gale.

Dans l'expérience que nous venons de décrire, les deux charbons s'usent, et s'usent inégalement, *a* plus vite que *c*. Il résulte de là que leur intervalle tend à augmenter, et que par suite la lumière s'affaiblit et même s'éteint.

Afin d'obvier à cet inconvénient, M. Duboscq ajoute à son appareil

un régulateur P, à l'aide duquel l'intervalle des deux charbons reste sensiblement constant. Pour cela, dans l'intérieur du cylindre P est un mouvement d'horlogerie qui est réglé par le passage même de l'électricité, au moyen d'un appareil qui sera décrit plus tard sous le nom d'*électro-aimant*. Quand les deux charbons sont rapprochés, cet électro-aimant est dans toute sa force et maintient fixe une plaque de fer qui arrête les pièces qui tendent à faire marcher les charbons. Mais lorsque l'intervalle des charbons augmente, la quantité d'électricité qui passe dans les charbons s'affaiblit, et l'électro-aimant, perdant de sa force, laisse fonctionner un système de ressorts et de leviers qui font rapprocher les charbons.

L'appareil MN, abstraction faite des tubes A, B, D, est devenu, entre les mains de M. Duboscq, un *appareil photogénique* universel. En remplaçant le microscope ABD successivement par des *têtes* de fantasmagorie, de polyorama, de mégascope, par des appareils polariseurs, on arrive à répéter, avec ce seul appareil, toutes les expériences de l'optique. Aussi est-il substitué avantageusement aujourd'hui à celui connu anciennement sous le nom de *microscope à gaz*.

* 481. **Lentilles à échelons; phares.** — Les lentilles de grandes dimensions présentent de grandes difficultés de construction; elles donnent lieu, en outre, à une forte aberration de sphéricité, et perdent beaucoup de leur diaphanéité à cause de leur épaisseur. C'est pour obvier à ces inconvénients qu'on a construit les *lentilles à échelons*. Ces lentilles, imaginées par Buffon et perfectionnées par Fresnel, sont formées, au centre, d'une lentille plan-convexe C (fig. 332 et 333), entourée d'une suite de segments annulaires et concentriques A, B, dont chacun a une face plane située du même côté que la face plane de la lentille centrale, tandis que les faces opposées ont une courbure telle que les foyers des différents segments viennent se former au même point. L'ensemble de ces anneaux forme donc, avec la lentille centrale, une lentille unique représentée en coupe dans la figure 333. Notre dessin a été fait d'après une lentille de 60 centimètres de diamètre environ, et dont les segments annulaires sont formés d'une seule pièce de verre; mais dans les lentilles plus grandes, chaque segment est lui-même formé de plusieurs pièces.

Derrière la lentille est un support fixé par trois tringles, sur lequel se posent les corps qu'on veut soumettre à l'action des rayons solaires qui tombent sur la lentille. Le centre du support correspondant au foyer, les substances qu'on y place sont fondues et volati-

lisées par la haute température qui se produit. L'or, le platine, le quartz, sont fondus rapidement. Cette expérience montre que le calorique se réfracte suivant les mêmes lois que la lumière, puisque le foyer de chaleur se forme au même point que le foyer lumineux.

Autrefois, on faisait usage de réflecteurs paraboliques pour porter

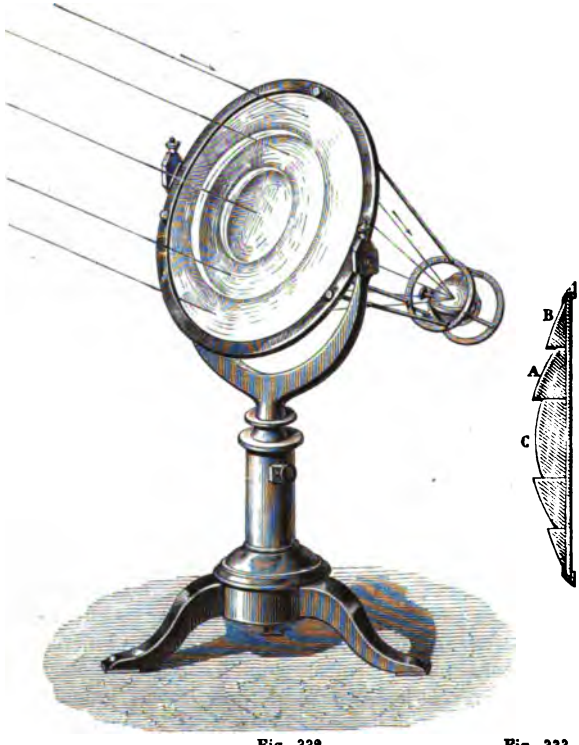


Fig. 332. Fig. 333

à de grandes distances la lumière des *phares*. On nomme ainsi des feux qu'on allume sur les côtes, pendant la nuit, pour servir de guides aux navigateurs. Aujourd'hui, on fait uniquement usage de lentilles à échelons. Le feu est produit par une lampe à 3 ou 5 mèches concentriques, qui donne autant de lumière que 15 lampes Carcel. Ce feu étant placé au foyer principal d'une lentille à échelons, du côté de la face plane, les rayons émergents forment un faisceau

parallèle (fig. 280) qui ne perd de son intensité que par son passage à travers l'atmosphère (461), et peut être visible jusqu'à 60 à 70 kilomètres. Pour que tous les points de l'horizon soient successivement éclairés par un même phare, la lentille se meut autour de la lampe, au moyen d'un mécanisme d'horlogerie, et fait sa révolution en un temps qui varie d'un phare à un autre. Il en résulte que pour les différents points de l'horizon, il y a successivement apparition et éclipse de lumière à des intervalles de temps égaux. Les éclipses servent aux marins pour distinguer les phares d'un feu accidentel : de plus, c'est d'après le nombre d'éclipses qui se produisent dans un temps donné qu'ils reconnaissent le phare, et par suite la côte qu'ils ont devant eux.

CHAPITRE VI.

DE L'ŒIL CONSIDÉRÉ COMME INSTRUMENT D'OPTIQUE.

482. Structure de l'œil humain. — L'*œil* est l'organe de la *vision*, c'est-à-dire du phénomène en vertu duquel la lumière émise ou réfléchie par les corps fait naître en nous la sensation qui nous décèle leur présence.

Situé dans une cavité osseuse qu'on nomme *orbite*, l'œil est maintenu par les mus-

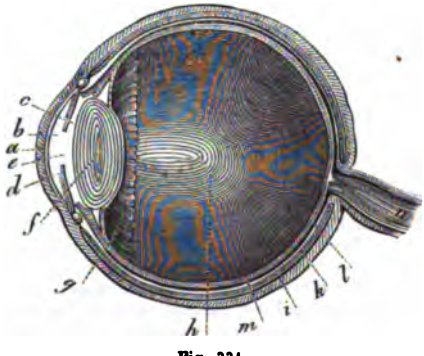


Fig. 334.

cles qui servent à le mouvoir, par le nerf optique, la conjonctive, les paupières et l'aponévrose orbito-oculaire. Tous ces moyens, en lui assurant une contention solide, lui permettent des mouvements très-variés et très-étendus. Son volume est à peu près le même chez tous les individus; l'ouverture variable des paupières le fait seul paraître plus ou moins volumineux.

La figure 334 montre une coupe transversale de l'œil d'avant en arrière. On voit

que sa forme générale est celle d'un sphéroïde dont la courbure, à la partie antérieure, est plus grande qu'à la partie postérieure. L'œil est composé de membranes et de milieux, qui sont : la *cornée*, la *sclérotique*, l'*iris*, la *pupille*, l'*humeur aqueuse*, le *cristallin*, le *corps vitré*, la *membrane hyaloïde*, la *choroïde*, la *rétine* et le *nerf optique*.

Cornée. — La cornée *a* est une membrane transparente située en avant du globe de l'œil. Elle a sensiblement la forme d'une petite calotte sphérique ayant une base de 11 à 12 millimètres de diamètre. Sa circonférence, taillée en biseau aux dépens de sa face externe, s'enchâsse dans la sclérotique *i*, et l'adhérence de ces deux membranes est telle, qu'elles ont été considérées par quelques anatomistes comme une seule et même membrane.

Sclérotique. — La sclérotique *i* est une membrane qui, avec la cornée, enveloppe toutes les parties constituantes de l'œil. Elle présente, en avant, une ouverture à peu près circulaire, dans laquelle est enchâssée la cornée; à la partie postérieure et interne, elle est perforée pour donner passage au nerf optique.

Iris. — L'iris *d* est un diaphragme annulaire, opaque, adhérent par son périmètre extérieur, et libre par son bord central. Cette membrane est placée entre la cornée et le cristallin. C'est elle qui forme la partie colorée de l'œil; elle est percée, non pas à son centre, mais un peu en dedans, d'une ouverture qu'on nomme *pupille*, et qui, chez l'homme, est circulaire. Chez quelques animaux, elle est étroite et allongée dans le sens vertical, particulièrement chez ceux du genre *felis*, et dans le sens transversal chez les ruminants. C'est par la pupille que les rayons lumineux pénètrent dans l'œil. Son diamètre, variable pour un même individu, est, en moyenne, de 3 à 7 millimètres; mais ces limites peuvent être dépassées. Les alternatives d'agrandissement et de resserrement de la pupille s'opèrent rapidement; elles sont fréquentes, et jouent un rôle important dans le phénomène de la vision. La pupille se contracte sous l'influence d'une vive lumière; elle se dilate, au contraire, dans l'obscurité. Les mouvements de l'iris paraissent être involontaires.

D'après ce qui précède, l'iris est un écran à ouverture variable, dont la fonction est de régler la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil, puisque la grandeur de la pupille varie en sens contraire de l'intensité de la lumière. L'iris sert encore à corriger l'aberration de sphéricité, en empêchant les rayons marginaux de traverser les bords du cristallin, c'est-à-dire qu'il remplit à l'égard de l'œil le rôle d'un diaphragme dans les instruments d'optique (448).

Humeur aqueuse. — Entre la partie postérieure de la cornée et la partie antérieure du cristallin est un liquide transparent, qu'on appelle humeur aqueuse. L'espace *e*, occupé par cette humeur, est partagé en deux compartiments par l'iris; la partie *b*, comprise entre la cornée et l'iris, se nomme *chambre antérieure;* la partie *c*, qui est entre l'iris et le cristallin, est la *chambre postérieure*.

Cristallin. — Le cristallin est un corps lenticulaire *f*, placé derrière l'iris et très-près de cette membrane. Remarquable par sa transparence, le cristallin est enveloppé dans une membrane diaphane comme lui, qu'on nomme sa *capsule*, et qui adhère par son bord à la couronne annulaire formée par les *procès ciliaires g*.

La face antérieure du cristallin a une convexité moindre que la face postérieure. Son tissu est composé d'une suite de lamelles à peu près concentriques, plus dures au centre qu'à la circonférence. Les couches les plus superficielles ont une mollesse telle, qu'elles sont presque à l'état liquide. On leur a donné le nom d'*humeur de Morgagni*. Le pouvoir réfringent de ces couches décroît du centre à la périphérie.

Corps vitré, membrane hyaloïde. — On appelle corps vitré, ou humeur vitrée, une masse transparente, comparable à l'albumine de l'œuf, qui occupe toute la partie *h* du globe de l'œil située en arrière du cristallin. Le corps vitré est enveloppé par la *membrane hyaloïde i*, qui tapisse la face postérieure de la capsule cristalline et toute la face interne d'une autre membrane qu'on nomme rétine.

Rétine, nerf optique. — La rétine *m* est une membrane destinée à recevoir l'impression de la lumière et à la transmettre au cerveau par l'intermédiaire d'un nerf *n*, nommé le nerf optique, qui part du cerveau, pénètre dans l'œil et s'épanouit sur la rétine, sous la forme d'un réseau nerveux.

La rétine et le nerf optique ne jouissent que de la propriété spéciale de recevoir et de transmettre au cerveau l'impression des images; ils sont tout à fait insensibles à l'action des corps vulnérants. Ces organes ont été coupés, piqués, sans que les animaux soumis à ces expériences aient manifesté la moindre douleur.

Choroïde. — La choroïde *k* est une membrane interposée entre la rétine et la sclérotique. Elle est essentiellement vasculaire, et recouverte, sur sa face interne principalement, d'une matière noire semblable au pigment de la peau des nègres, et destinée à absorber tous les rayons qui ne doivent pas coopérer à la vision.

La choroïde se prolonge en avant, en formant une suite de replis saillants *g*, qu'on nomme *procès ciliaires*, et qui s'engagent entre l'iris et la capsule cristalline à laquelle ils adhèrent, en formant autour d'elle un disque assez comparable à celui d'une fleur radiée. Par son tissu vasculaire, la choroïde sert à transporter le sang dans l'intérieur de l'œil, et surtout aux procès ciliaires.

483. Indices de réfraction des milieux transparents de l'œil. — Les indices de réfraction des parties transparentes de l'œil ont été déterminés par M. Brewster. Ils sont réunis dans le tableau suivant, avec celui de l'eau comme terme de comparaison :

Eau	1,3358	Enveloppe extérieure du cristallin.	1,3767
Humeur aqueuse	1,3366	Centre du cristallin	1,3990
Humeur vitrée	1,3394	Réfraction moyenne du cristallin	1,3839

484. Courbure et dimensions des diverses parties de l'œil humain.

Rayon de courbure de la sclérotique	10 à 11	millimètres.
Id. de la cornée	7 à 8	
Id. de la face antérieure du cristallin.	7 à 10	
Id. de la face postérieure	5 à 6	
Diamètre de l'iris	11 à 12	
Id. de la pupille	3 à 7	
Id. du cristallin	10	
Épaisseur du même	5	
Distance de la pupille à la cornée	2	
Longueur de l'axe de l'œil	22 à 24	

La courbure de la cornée, d'après M. Chossat, est celle d'un ellipsoïde de révolution autour de son grand axe, et la courbure du cristallin celle d'un ellipsoïde de révolution autour de son petit axe.

485. Marche des rayons dans l'œil. — D'après les diverses parties qui composent l'œil, on peut comparer cet organe à une chambre obscure (472) dont la pupille est l'ouverture, le cristallin la lentille convergente, et la rétine l'écran sur lequel va se peindre l'image. L'effet est donc le même que celui par lequel se forme, au foyer conjugué d'une lentille bi-convexe, l'image d'un objet placé en avant de la lentille. Soit, en effet, un objet AB (fig. 335), placé en avant de l'œil, et considérons les rayons émis d'un point quelconque A de cet objet. De tous ces rayons, ceux qui sont dirigés vers la pupille sont les seuls qui pénètrent dans l'œil et qui soient utilisés

pour la vision. Ces rayons, à leur entrée dans l'humeur aqueuse, éprouvent une première réfraction qui les rapproche de l'axe Oo, tiré par le centre optique du cristallin; puis ils rencontrent celui-ci qui les réfracte de nouveau comme une lentille biconvexe; et, enfin, après avoir subi une dernière réfraction dans l'humeur vitrée, ils

Fig. 335.

vont concourir en un point *a* et y former l'image du point A. Les rayons partis du point B allant de même former en *b* l'image de ce point, il en résulte une image *ab* très-petite, réelle et renversée, qui se forme exactement sur la rétine quand l'œil est bien conformé.

486. **Renversement des images.**— Pour s'assurer que les images formées sur la rétine sont bien réellement renversées, on prend un œil d'albinos, parce que la choroïde des yeux de ces animaux est privée de pigment, et que, par conséquent, la lumière peut la traverser complétement; puis on dépouille cet œil, à la partie postérieure, du tissu cellulaire qui l'enveloppe. Ainsi préparé on le fixe à une ouverture pratiquée au volet d'une chambre obscure, et on observe alors, à l'aide d'une loupe, que les images renversées des objets extérieurs viennent se peindre sur la rétine.

Le renversement des images dans l'œil a beaucoup occupé les physiciens et les physiologistes, et de nombreuses théories ont été proposées pour expliquer comment nous

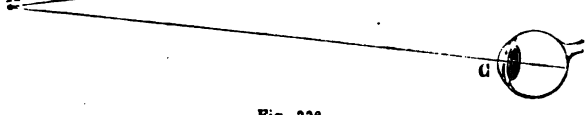


Fig. 336.

ne voyons pas les objets renversés. Les uns ont admis que c'est par l'habitude et par une véritable éducation de l'œil que nous voyons les objets redressés, c'est-à-dire dans leur position relative par rapport à nous. D'autres pensent que nous rapportons le lieu réel des objets dans la direction des rayons lumineux qu'ils émettent, et que ces rayons se croisant dans le cristallin (fig. 335), l'œil voit les points A et B respectivement dans la direction *a*A et B*b*; par suite l'objet paraît droit. Telle était l'opinion de d'Alembert. Muller, Volkmann et autres soutiennent que comme nous voyons tout renversé, et non pas uniquement un objet parmi d'autres, rien ne peut paraître renversé puisque nous manquons alors de termes de comparaison. Il faut avouer qu'aucune de ces théories n'est bien satisfaisante.

487. **Axe optique, angle optique, angle visuel.** — On nomme *axe*

optique principal d'un œil son axe de figure, c'est-à-dire la droite par rapport à laquelle il est symétrique. Dans un œil bien conformé, c'est la droite qui passe par le centre de la pupille et par le centre du cristallin; telle est la droite Oo (fig. 335). Les lignes Aa, Bb, qui sont sensiblement rectilignes, sont des axes secondaires. C'est dans la direction de l'axe optique principal que l'œil voit le plus nettement les objets.

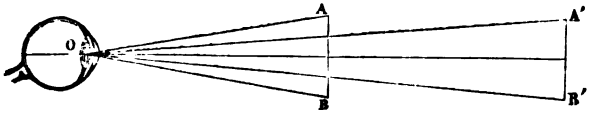


Fig. 337.

L'angle optique est l'angle BAC (fig. 336) formé par les axes optiques principaux des deux yeux, lorsqu'ils sont dirigés vers un même point. Cet angle est d'autant plus petit que les objets sont plus éloignés.

L'angle visuel est l'angle AOB (fig. 337), sous lequel est vu un objet, c'est-à-dire l'angle formé par les axes secondaires menés du centre optique du cristallin aux extrémités opposées de l'objet. Pour une même distance, cet angle décroît avec la grandeur de l'objet, et pour un même objet, il décroît avec la distance, comme il arrive si l'objet passe de AB en A'B'. Il résulte de là que les objets paraissent d'autant plus petits qu'ils sont plus éloignés, car les axes secondaires AO, BO, se croisant au centre du cristallin, la grandeur de l'image projetée sur la rétine dépend de la valeur de l'angle visuel AOB.

488. Appréciation de la distance et de la grandeur des objets. — L'appréciation de la distance et de la grandeur dépend du concours de plusieurs circonstances qui sont : l'angle visuel, l'angle optique, la comparaison avec des objets dont la grandeur nous est familière, la diminution de netteté de l'image par l'interposition d'un air plus ou moins vaporeux.

Lorsque la grandeur d'un objet est connue, comme la taille d'un homme, la hauteur d'un arbre ou d'une maison, on en apprécie la distance par l'ouverture de l'angle visuel sous lequel on le voit. Si la grandeur de l'objet est inconnue, on la juge relativement à celle des objets qui l'entourent.

Une colonnade, une avenue d'arbres, nous paraissent diminuer de grandeur à mesure que leur distance augmente, parce que l'angle visuel décroît; mais l'habitude de voir des colonnes, des arbres, avec la hauteur qui leur convient, fait que notre jugement rectifie l'apparence produite par la vision. De même, quoique des montagnes fort éloignées soient vues sous un fort petit angle et n'occupent qu'un faible espace dans le champ de la vision, habitués aux effets de perspective aérienne, nous leur restituons leur grandeur réelle.

L'angle optique est aussi un élément essentiel pour apprécier la distance; cet angle augmentant ou diminuant quand les objets s'approchent ou s'éloignent, le mouvement que nous imprimons à nos yeux pour que leurs axes optiques concourent vers l'objet que nous regardons, nous donne l'idée de son éloignement. Toutefois, ce n'est que par une longue habitude que nous arrivons à établir ainsi une relation entre la distance qui nous sépare des objets et le mouvement correspondant de nos yeux. On remarque, en effet, que les aveugles de naissance auxquels on rend la vue par l'opération de la cataracte, jugent d'abord tous les objets à la même distance.

489. Distance de la vue distincte. — On appelle *distance de la vue distincte* la distance à laquelle les objets doivent être placés pour être vus avec plus de netteté. Cette distance varie avec les individus, et souvent, pour le même individu

d'un œil à l'autre. Pour de petits objets, comme des caractères d'imprimerie, elle est, à l'état normal de l'œil, de 25 à 30 centimètres. Les personnes qui ne voient qu'à une distance plus courte sont *myopes*, et celles qui ne voient qu'à une distance plus grande sont *presbytes* (500).

490. Adaptation de l'œil à toutes les distances. — L'œil présente une propriété remarquable qui ne se rencontre, au même degré, dans aucun instrument d'optique : c'est que, quoique les images tendent à se former d'autant plus en avant de la rétine que les objets sont plus éloignés (445), elles viennent se former toujours sur cette membrane; car l'œil voit nettement à des distances très-variables, à partir de celle qui correspond à la vue distincte. Toutefois, si nous pouvons voir nettement à des distances très-inégales, nous ne le pouvons pas simultanément, ce qui indique quelques modifications dans le système de l'œil, ou du moins la necessité de fixer notre attention sur l'objet que nous voulons voir. En effet, si l'on vise deux objets alignés, situés, par exemple, l'un à un mètre, l'autre à deux mètres de l'œil, en fixant le premier objet, le second paraît nébuleux, tandis que si l'on fixe le second, c'est le premier à son tour qui devient nébuleux. On conclut de là que quand l'œil a été disposé pour voir à une distance, il ne l'est pas pour voir à une autre, mais qu'il peut successivement s'adapter à l'une et à l'autre.

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer comment l'œil peut voir nettement à des distances très-différentes. MM. Mile et Pouillet en voient la cause dans les dilatations et les contractions de la pupille. Le premier pense que les rayons lumineux éprouvent, sur les bords de l'iris, une diffraction ou inflexion qui peut donner lieu à des distances focales très-différentes. Se fondant sur l'inégale réfrangibilité du cristallin, laquelle décroît du centre à la circonférence, et observant qu'il doit en résulter une suite de foyers dont les plus rapprochés sont formés par les rayons qui traversent le cristallin plus près de son centre, M. Pouillet admet que la pupille s'ouvrant plus ou moins, les objets éloignés sont vus par les bords du cristallin, et les plus rapprochés par le centre. On remarque, en effet, que les contractions et les dilatations du trou pupillaire sont liées à l'accommodation de l'œil aux distances; mais il importe d'observer qu'elles le sont aussi aux variations d'intensité de la lumière, et que, pour une même distance, l'ouverture de la pupille peut varier beaucoup.

Rohaut, Olbers et autres, ont émis l'opinion que le diamètre de l'œil, d'avant en arrière, varie sous l'influence de la pression des muscles qui font mouvoir cet organe, de manière à rapprocher ou à écarter la rétine du cristallin, en même temps que l'image s'en approche ou s'en écarte elle-même ; car on sait (441, 2°) que dans les lentilles convergentes, l'image se rapproche à mesure que l'objet s'éloigne.

Hunter et Yung ont attribué au cristallin une propriété contractile en vertu de laquelle il prend une forme plus ou moins convexe, de manière à faire toujours converger les rayons sur la rétine.

Képler, Camper et beaucoup d'autres ont admis que, par l'action des procès ciliaires, le cristallin peut se déplacer et se rapprocher plus ou moins de la rétine.

Enfin, on a admis que la netteté de la vision à des distances très-diverses peut provenir, non pas de ce que la rétine ou le cristallin se déplace de manière que l'image vienne toujours se former sur la rétine, mais de ce que les variations qu'éprouve la distance focale du cristallin, à mesure que les objets s'éloignent, sont assez petites pour que l'image conserve encore une netteté suffisante.

Cette dernière théorie est confirmée par les expériences de Magendie et par celles de Haldat. Le premier a observé, avec un œil d'albinos, que la netteté des images ne variait pas pour des objets placés à des distances fort inégales ; et de Haldat a trouvé que, si l'on place un cristallin comme objectif au volet d'une chambre obscure, on obtient, sur un verre dépoli, des images également nettes des objets extérieurs, que ceux-ci soient à la distance de 3 à 4 décimètres, ou de 20 à 30 mètres.

Cette propriété du cristallin à l'état d'inertie semble contraire aux lois de la réfraction; elle doit être attribuée à la structure de cet organe qu'elle distingue tout à fait des lentilles ordinaires. De Haldat n'a point donné l'explication de ces phénomènes; c'est à Sturm qu'est due la théorie suivante.

491. **Théorie de la vision de Sturm.** — Pour expliquer comment l'œil peut s'adapter à toutes les distances, Sturm observe que, d'après les travaux des physiologistes Yung, Chossat et autres, les courbures des différents milieux de l'œil n'étant pas sphériques, cet organe ne doit point être assimilé d'une manière absolue à un système de lentilles homogènes et sphériques, juxtaposées sur un même axe, et que le cristallin, en particulier, n'est pas comparable à une lentille sphérique ordinaire. Il admet enfin qu'on doit regarder l'œil comme formé de plusieurs milieux inégalement réfringents, séparés par des surfaces qui non-seulement ne sont pas sphériques, mais qui ne forment pas un système symétrique autour d'un axe commun.

Cela posé, s'appuyant sur des considérations géométriques relatives aux surfaces connues, en mathématiques, sous le nom de *surfaces gauches*, Sturm cherche la forme que prend un faisceau lumineux très-mince, qui s'est réfracté successivement dans différents milieux inégalement réfringents. En considérant le cas où le faisceau traverse un diaphragme d'une très-petite ouverture, dont le plan est perpendiculaire à l'axe du faisceau, et en supposant les rayons lumineux émanés d'un point situé sur cet axe, Sturm trouve, par le calcul, que les intersections successives de ces rayons forment une surface caustique (448) qui rencontre l'axe du faisceau en deux points, et qu'entre ces points le faisceau est plus condensé que partout ailleurs, mais qu'au delà, en avant et en arrière, le faisceau est de plus en plus divergent. Sturm a nommé ces deux points que nous désignerons par les lettres F et *f*, les *foyers* du faisceau, et la distance qui les sépare, l'*intervalle focal* du faisceau. Appliquant à la vision les considérations théoriques qui précèdent, Sturm s'exprime en ces termes :

« On a admis généralement que pour avoir la vision distincte d'un point lumineux, il fallait que les rayons émanés de ce point vinssent converger et former leur foyer sur la rétine, ou du moins très-près de la rétine. Mais les considérations qui précèdent prouvent, ce me semble, qu'il n'y a pas un foyer ou point de convergence unique; ce qui existe toujours pour un faisceau très-mince qui a pénétré dans l'humeur vitrée et qui vient rencontrer la rétine, c'est ce que j'ai appelé plus haut l'*intervalle focal*, qui peut être plus ou moins long. Cet intervalle ne peut pas être absolument nul dans l'œil, car l'œil offre un assemblage de différents milieux inégalement réfringents (au nombre de trois au moins, en négligeant la cornée); et ces milieux sont séparés par des surfaces qui ne sont pas rigoureusement sphériques ni même symétriques par rapport à un axe commun.

« Je pense donc que, dans l'œil, l'intervalle focal propre à chaque faisceau provenant d'un point extérieur, est non pas nul, mais seulement très-petit, de 1 ou 2 millimètres au plus. J'admets, selon l'opinion générale des physiologistes, que c'est la rétine seule qui reçoit l'impression de la lumière (ou, selon Mariotte et Brewster, l'enveloppe choroïde qui se trouve immédiatement au-dessous de la rétine, celle-ci étant transparente). La direction du rayon central sur laquelle se trouvent les foyers F et *f* étant perpendiculaire à la surface de la rétine, le point d'où émanent les rayons lumineux sera vu avec une netteté suffisante, si la ligne F*f*, quoique très-courte, rencontre la rétine en un point situé entre F et *f*, et même encore un peu au delà de F ou en deçà de *f*; car alors le mince faisceau lumineux que la pupille a laissé passer interceptera sur la surface de la rétine un espace extrêmement petit, incomparablement moindre que la section faite dans ce faisceau très-près du cristallin. »

En résumé, dans la théorie de Sturm, le lieu où la lumière peut agir sur la rétine n'est pas un point unique, mais un *foyer linéaire* F*f*, dans toute l'étendue duquel le

faisceau lumineux qui pénètre dans la pupille est assez condensé pour faire naître dans l'œil la sensation de la vision. Par conséquent, lorsque les objets extérieurs s'éloignent ou se rapprochent, il suffit, pour que nous voyions distinctement, que la rétine soit toujours comprise entre les deux foyers F et *f*, ou coïncide sensiblement avec l'un d'eux.

492. Vue simple avec les deux yeux.— Lorsque les deux yeux se fixent sur un même objet, il se forme, sur chaque rétine, une image, et cependant nous ne voyons qu'un objet. Pour expliquer la vue simple avec les deux yeux, Gassendi admettait qu'à un même instant la perception n'a lieu que pour l'une ou l'autre image, ce qui ne peut être admis d'après les expériences de M. Wheatstone, que nous rapportons plus bas.

Taylor et Wollaston ont émis l'opinion que deux points homologues de droite ou de gauche, sur les deux rétines, correspondent à un même filet nerveux cérébral de droite ou de gauche, bifurqué à l'entre-croisement des deux nerfs optiques. Cette opinion est d'accord avec un fait qu'on observe chez quelques individus, c'est la paralysie transitoire de la rétine, par moitié et du même côté pour chaque œil, de droite ou de gauche simultanément, en sorte que les malades ne voient que la moitié droite ou la moitié gauche des objets. Wollaston et Arago ont observé sur eux-mêmes cette affection de la rétine.

M. Brewster attribue l'unité de sensation à l'habitude que nous acquérons de rapporter à un même objet les impressions simultanées produites sur les deux rétines.

Voici les principaux faits qui s'observent dans la vision avec les deux yeux : on voit plus clair avec deux yeux qu'avec un seul ; en regardant un même objet d'abord avec un seul œil, puis avec les deux, la différence d'éclat est très sensible.

Lorsque les deux yeux sont fixés chacun sur un objet différent, de manière que les deux axes optiques concourent au delà ou en deçà de ces objets, il peut se produire des illusions d'optique remarquables. Par exemple, si l'on regarde deux objets iden-

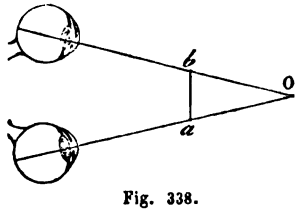


Fig. 338.

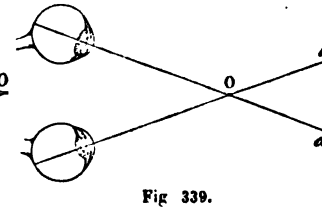


Fig 339.

tiques et de petites dimensions *a* et *b*, au moyen de deux tubes isolants qui donnent aux axes optiques des deux yeux les directions concourantes *a*O et *b*O (fig. 338), on ne voit qu'un objet unique, mais plus éloigné, au point de rencontre O des deux axes.

Si le point de croisement des deux axes est en avant des points qu'on regarde (fig. 339), on ne voit encore qu'un seul objet, mais plus près, au point O.

Si les objets *a* et *b* sont deux petits disques, l'un rouge et l'autre vert, on voit un disque blanc, le vert et le rouge étant deux couleurs complémentaires (455). Ces diverses expériences démontrent que les impressions dans les deux yeux sont simultanées et se superposent pour donner une sensation unique.

On doit à M. Wheatstone des expériences nombreuses qui montrent une différence

essentielle entre la vision avec les deux yeux et la vision avec un seul œil. Il résulte de ces expériences que ce n'est qu'avec les deux yeux qu'on peut avoir une perception nette du relief des corps, c'est-à-dire de leurs trois dimensions. Il est même probable qu'avec un seul œil le relief ne nous paraît appréciable que parce que les objets que nous regardons nous sont généralement connus. En effet, dans la vision avec les deux yeux, quand l'objet est à une faible distance, les deux axes devant converger vers l'objet, il en résulte que la perspective change pour chaque œil et que les deux images sont sensiblement inégales. C'est ce qu'il est facile de constater en regardant alternativement un même objet avec chaque œil. Or, c'est de la perception simultanée de ces deux images que paraît résulter la perception du relief, comme le démontre l'expérience suivante.

493. **Stéréoscope.** — M. Wheatstone a imaginé un appareil ingénieux, le *stéréoscope*, qui sert à rendre sensible l'effet de la vision avec les deux yeux pour l'estimation du relief des corps. Cet appareil, modifié par M. Brewster, consiste en une petite boîte de bois dont la paroi supérieure porte deux tubes directeurs des axes optiques Sur le fond de la boîte sont deux dessins que chaque œil voit isolément au travers d'un verre convergent placé dans les tubes. Ces dessins représentent le même objet, mais vu avec une perspective différente, qui est précisément celle qui correspondrait à l'axe optique de chaque œil s'il regardait l'objet à une petite distance. Il résulte de là qu'en regardant à travers les deux tubes, chaque œil reçoit la même impression que s'il regardait l'objet même, et il en résulte une perception tellement distincte et vive du relief que l'illusion est complète et vraiment surprenante.

A l'aide du stéréoscope, M. Foucault et M. le docteur Regnault ont constaté que lorsque les deux rétines sont impressionnées simultanément par deux couleurs différentes, il y a perception d'une couleur mixte unique. Mais ils ont reconnu que l'aptitude à la recomposition des deux teintes en une teinte unique, varie d'une manière notable d'un individu à un autre, et peut être excessivement faible, même nulle chez quelques personnes. En éclairant avec deux faisceaux de couleurs complémentaires (455), deux disques blancs, placés au fond du stéréoscope, et en regardant chaque disque coloré avec un œil, on voit un disque blanc unique, ce qui montre que la sensation de la lumière blanche peut naître de deux impressions chromatiques complémentaires et simultanées sur chacune des deux rétines.

494. **Partie insensible de la rétine.** — La rétine n'est pas également sensible dans toutes ses parties, ainsi que le prouve l'expérience suivante due à Mariotte : on marque deux points noirs sur du papier blanc, à quelques centimètres de distance l'un de l'autre; puis, le papier étant très-rapproché de l'œil, on fixe le point de gauche avec l'œil droit, ce qui n'empêche pas de voir l'autre point; mais si l'on éloigne lentement le papier, le point de droite disparaît à une certaine distance pour reparaître bientôt si l'on continue à éloigner le papier. La même chose a lieu si l'on regarde le point de droite avec l'œil gauche.

Mariotte a remarqué qu'au moment où le point cesse d'être visible, son image se projette sur l'insertion même du nerf optique à la partie interne et inférieure de l'œil. On a donné le nom de *punctum cæcum* à ce point insensible à l'action de la lumière.

495 **Persistance de l'impression sur la rétine.** — Lorsqu'on fait tourner rapidement un charbon incandescent, on aperçoit comme un ruban de feu continu; de même, la pluie qui tombe sous forme de grosses gouttes apparaît dans l'air comme une suite de filets liquides. Ces différentes apparences sont dues à ce que l'impression des images sur la rétine persiste encore après que l'objet qui l'a produite a disparu ou s'est déplacé. La durée de cette persistance varie avec la sensibilité de la rétine et l'intensité de la lumière. M. Plateau, à Bruxelles, a trouvé, par différentes méthodes, qu'elle est, en moyenne, d'une demi-seconde.

L'impression des couleurs persiste aussi bien que celle de la forme des objets; car si l'on fait tourner des cercles divisés en secteurs peints de diverses couleurs, alors celles-ci se confondent et donnent la sensation de la couleur qui résulterait de leur mélange. Le bleu et le jaune donnent le vert; le jaune et le rouge, l'orangé; le bleu et le rouge, le violet; les sept couleurs du spectre, le blanc, comme le démontre le disque de Newton (453, 5°).

Il existe plusieurs appareils curieux dont les effets s'expliquent par la persistance de la sensation sur la rétine. Tels sont le *thaumatrope*, la *phénakistikope*, la *roue de Faraday*, le *kaléidophone*.

496. **Images accidentelles.** — Un objet coloré étant placé sur un fond noir, si on le regarde fixement pendant un certain temps, la vue est bientôt fatiguée, et l'intensité de la couleur s'affaiblit; dirigeant alors les yeux sur un carton blanc, ou sur le plafond, on aperçoit une image de même forme que l'objet, mais d'une couleur complémentaire (455), c'est-à-dire qui formerait du blanc si elle était réunie à celle de l'objet. Pour un objet vert, l'image est rouge, et réciproquement; si l'objet est jaune, l'image est violette. Ces apparences colorées ont été signalées par Buffon, qui leur a donné le nom d'*images* ou de *couleurs accidentelles*.

Les couleurs accidentelles persistent d'autant plus longtemps que l'objet observé a été plus vivement éclairé et que l'action de la lumière a été prolongée davantage. Elles ne s'éteignent pas, en général, d'une manière progressive continue, mais offrent ordinairement des disparitions et des réapparitions alternatives. On observe aussi que si, après avoir contemplé un objet coloré, on ferme les yeux rapidement en les abritant aussi parfaitement que possible de toute lumière, au moyen d'une étoffe épaisse, les images accidentelles n'en apparaissent pas moins.

Plusieurs théories ont été proposées pour expliquer le phénomène des couleurs accidentelles. Darwin a admis :

1° Que la partie de la rétine fatiguée par une couleur est devenue insensible aux rayons de cette couleur et n'est plus impressionnée que par sa couleur complémentaire;

2° Que cette partie de la rétine prend *spontanément* un mode d'action *opposé* qui produit la sensation de la couleur complémentaire.

La première partie de cette théorie n'explique pas le fait ci-dessus, que les couleurs accidentelles apparaissent même dans l'obscurité; et la seconde partie n'est que l'énoncé même du phénomène des images accidentelles.

497. **Irradiation.** — L'*irradiation* est un phénomène par lequel les objets blancs ou d'une couleur très-vive, lorsqu'ils sont vus sur un fond obscur, paraissent avec des dimensions plus grandes que celles qui leur sont propres. L'inverse a lieu pour un corps noir vu sur un fond blanc. On admet que l'irradiation provient de ce que l'impression sur la rétine se propage plus ou moins au delà du contour de l'image.

L'effet de l'irradiation est très-sensible sur la grandeur apparente des astres, qui peuvent ainsi paraître plusieurs fois plus grands qu'ils ne sont réellement.

D'après les recherches de M. Plateau, l'irradiation varie considérablement d'une personne à une autre, et même d'un jour à l'autre pour une même personne. Ce savant a constaté, en outre, que l'irradiation croît avec l'éclat de l'objet et la durée de la contemplation. Enfin, elle se manifeste à toutes les distances, les lentilles divergentes l'augmentent, celles qui sont convergentes la diminuent.

498. **Auréole accidentelle; contraste des couleurs.** — On nomme *auréoles accidentelles*, des couleurs qui, au lieu de succéder à l'impression d'un objet, comme les couleurs accidentelles, apparaissent autour de l'objet lui-même lorsqu'on le regarde fixement. L'impression de l'auréole est opposée à celle de l'objet;

c'est-à-dire que si celui-ci se détache en clair, l'auréole est obscure ; elle est claire, si l'objet est obscur.

Le *contraste des couleurs* est une réaction réciproque qui s'exerce entre deux couleurs voisines, réaction en vertu de laquelle à chacune d'elles s'ajoute la couleur complémentaire de l'autre. Ce contraste a été observé par M. Chevreul, qui en a fait une étude approfondie et en a donné la loi. C'est par l'influence réciproque des auréoles accidentelles que s'explique le contraste des couleurs.

M. Chevreul a trouvé que les couleurs rouge et orangé étant juxtaposées, le rouge tire sur le violet, et l'orangé sur le jaune. Si l'on expérimente sur le rouge et le bleu, la première couleur tire sur le jaune et la seconde sur le vert; avec le jaune et le bleu, le jaune passe à l'orangé et le bleu à l'indigo; et ainsi de suite pour un grand nombre de combinaisons. On conçoit combien il importe, dans la fabrication des étoffes, des tapis, de savoir apprécier l'effet dû au contraste des couleurs.

499. L'œil n'est pas achromatique. — On a longtemps attribué à l'œil humain un achromatisme parfait (460); mais cette opinion ne peut être admise d'une manière absolue depuis les diverses expériences de Wollaston, de Yung, de Fraünhofer et de Muller.

Fraünhofer a observé que dans une lunette à deux verres, un fil très-fin, placé à l'intérieur de l'instrument, au foyer de l'objectif, est vu distinctement au travers de l'oculaire, lorsque la lunette est éclairée uniquement avec de la lumière rouge; mais que le fil cesse d'être visible si on éclaire la lunette avec de la lumière violette, l'oculaire étant resté dans la même position. Or, on remarque que, pour revoir le fil, il faut diminuer la distance des lentilles beaucoup plus que ne l'indique le degré de réfrangibilité de la lumière violette dans le verre. Il faut donc admettre que, dans cette expérience, il y a un effet dû à l'aberration de réfrangibilité de l'œil.

M. Muller, de son côté, en contemplant avec un seul œil un disque blanc placé sur un fond noir, a trouvé que l'image est pure quand l'œil est accommodé à la distance du disque, c'est-à-dire que l'image vient se faire sur la rétine ; mais il a observé que si l'œil n'est pas accommodé à cette distance, c'est-à-dire si l'image se fait en avant ou en arrière de la rétine, le disque paraît entouré d'une bande bleue très-étroite.

M. Muller conclut de ses expériences que l'œil est achromatique tant que l'image est reçue à la distance focale, ou tant qu'il s'accommode à la distance de l'objet. On ne peut pas dire jusqu'ici quelle est précisément la cause de cet achromatisme apparent de l'œil; mais on l'attribue généralement à la ténuité des faisceaux lumineux qui passent par l'ouverture pupillaire, et à ce que les rayons inégalement réfrangibles, rencontrant les surfaces des milieux de l'œil sous des incidences presque normales, sont très-peu réfractés, d'où il résulte que l'aberration de réfrangibilité est insensible (459).

Quant à l'aberration de sphéricité, on a déjà vu comment elle est corrigée par l'iris (482), véritable diaphragme arrêtant les rayons marginaux qui tendent à traverser le cristallin, et ne laissant passer que les plus rapprochés de l'axe.

500. Myopie ; presbytisme. — Les affections les plus communes de l'organe de la vue sont la myopie et le presbytisme. La *myopie* est une accommodation habituelle des yeux pour une distance moindre que celle de la vue distincte ordinaire, en sorte que les personnes qui en sont affectées ne voient nettement que les objets très-rapprochés. La cause ordinaire de la myopie est une trop grande convexité de la cornée ou du cristallin; l'œil étant alors trop convergent, le foyer, au lieu de se former sur la rétine, se forme en avant, ce qui fait que l'image est confuse. On remédie à ce défaut de l'œil au moyen de verres divergents, qui, en écartant les rayons de leur axe commun, reculent le foyer et le portent sur la rétine.

La contemplation habituelle de petits objets, les observations microscopiques,

peuvent faire naître la myopie. Ce vice de conformation est commun chez les jeunes gens; il diminue avec l'âge.

Le *presbytisme* est le contraire de la myopie. Dans cette affection, l'œil voit très-bien les objets éloignés, mais ne distingue pas nettement les objets rapprochés. Le presbytisme est dû à ce que l'œil n'étant pas assez convergent, l'image des objets rapprochés va se former au delà de la rétine; mais si les objets s'éloignent, l'image se rapproche de la rétine (441, 2°), et lorsqu'ils sont à une distance convenable, elle se forme exactement sur cette membrane; alors on voit nettement.

Le presbytisme se corrige au moyen de lunettes à verres convergents. Ces verres rapprochant les rayons avant leur entrée dans l'œil, il en résulte que si la convergence en est convenablement choisie, l'image peut se ramener exactement sur la rétine.

Il y a encore peu d'années qu'on faisait uniquement usage de verres bi-convexes pour les presbytes, et bi-concaves pour les myopes. Wollaston proposa, le premier, de remplacer ces verres par des lentilles concaves-convexes C et F (fig. 277), qu'on place de manière que leurs courbures soient de même sens que celle de l'œil. Ces verres faisant voir plus nettement les objets éloignés qui entourent l'axe optique, on leur a donné le nom de *verres périscopiques*.

501. Besicles. — Les verres dont se servent les myopes et les presbytes se désignent sous le nom général de *besicles*. On grave ordinairement sur ces verres des numéros qui marquent, *en pouces*, leur distance focale.

On peut calculer le numéro que doit prendre un presbyte ou un myope, lorsqu'on connaît la distance à laquelle il voit distinctement. Pour les presbytes, on fait usage de la formule $f = \frac{pd}{d - p}$ [1], dans laquelle f étant le numéro du verre qu'on doit adopter, p est la distance de la vue distincte pour les vues ordinaires, laquelle est de 30 centimètres ou 11 pouces, et d la distance de la vue distincte de la personne affectée de presbytisme.

La formule [1] ci-dessus se tire de l'égalité $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$ (449), en y remplaçant p' par d. On fait ici usage de la formule [6] du paragraphe 449, et non pas de la formule [5], parce que l'image qu'on voit dans les besicles étant du même côté que l'objet par rapport à la lentille, le signe de p' doit être contraire à celui de p, ainsi que cela a lieu pour les images virtuelles, d'après le paragraphe déjà cité.

Pour les myopes, on calcule f par la formule $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}$, qui appartient aux lentilles divergentes (449), et qui donne $f = \frac{pd}{p - d}$ [2], en remplaçant p' par d.

Soit proposé, par exemple, de calculer le numéro des verres que doit adopter un presbyte pour lequel la distance de la vue distincte est 35 pouces, sachant que la distance de la vue distincte ordinaire est de 11 pouces. En faisant $p = 11$ et $d = 35$, dans la formule [1] ci-dessus, on trouve $f = \frac{35 \times 11}{35 - 11} = 16$.

Quant à la mesure de la vue distincte, on l'obtient avec une assez grande précision au moyen d'un petit appareil qu'on nomme *optomètre*.

502. Diplopie. — La *diplopie* est une affection de l'œil qui fait qu'on voit les objets doubles, c'est-à-dire qu'on en voit deux au lieu d'un. En général, les deux images se superposent presque entièrement, et l'une d'elles est beaucoup plus apparente que l'autre. La diplopie peut résulter du concours de deux yeux inégaux; mais elle peut aussi affecter un seul œil. Ce dernier cas est sans doute dû à quelque défaut de conformation dans le cristallin ou dans d'autres parties de l'œil, qui fait que le

faisceau lumineux se bifurque et va former sur la rétine deux images au lieu d'une. Un seul œil peut même être affecté de *triplopie;* mais, dans ce cas, la troisième image est excessivement faible.

503. **Achromatopsie.** — On nomme *achromatopsie* une affection singulière qui nous rend incapables de juger des couleurs, ou du moins de certaines couleurs. Chez quelques personnes, en effet, l'insensibilité est complète, tandis que d'autres apprécient quelques couleurs. Les personnes atteintes de cette affection distinguent très-bien les contours des corps, les parties claires ou dans l'ombre, mais elles n'en distinguent pas les teintes.

D'Hombres-Firmas cite une personne affectée d'achromatopsie, qui avait peint dans son appartement, sur un dessus de porte, un paysage dont le terrain, les arbres, les maisons, les personnages, étaient bleus. Un visiteur lui ayant demandé pourquoi elle n'avait pas donné à chaque objet sa couleur propre, elle répondit qu'elle avait voulu assortir la couleur de son dessin à celle de son ameublement; or, celui-ci était rouge.

On désigne aussi l'achromatopsie sous le nom de *daltonisme*, parce que Dalton, qui l'a décrite avec soin, en était affecté.

CHAPITRE VII.

SOURCES DE LUMIÈRE.

504. **Diverses sources de lumière.** — Les diverses sources de lumière sont le soleil, les étoiles, la chaleur, les combinaisons chimiques, la phosphorescence, l'électricité et les phénomènes météoriques. Nous ne traiterons de ces deux dernières sources de lumière qu'aux articles *Électricité* et *Météorologie*.

L'origine de la lumière émise par le soleil et par les étoiles est inconnue; on admet seulement que la substance enflammée dont paraît entouré le soleil est gazeuse, parce que la lumière de cet astre, de même que celle qui est émise par les substances gazeuses enflammées, ne laisse apercevoir aucune trace de polarisation dans les lunettes polariscopes (520).

Quant à la lumière développée par la chaleur, d'après M. Pouillet, les corps commencent à devenir lumineux, dans l'obscurité, à une température de 500 à 600 degrés, et, au delà, la lumière qu'ils émettent est d'autant plus vive que leur température est plus élevée.

C'est par les hautes températures qui les accompagnent qu'un grand nombre de combinaisons chimiques donnent naissance à un dégagement de lumière. Telle est la cause des lumières artificielles utilisées pour l'éclairage; car, ainsi qu'on l'a déjà vu, les flammes ne sont autre chose que des matières gazeuses chauffées au point d'être lumineuses (383).

Les corps devenant lumineux à une température élevée, le calorique semble alors se transformer en lumière, ce qui tendrait à prouver que ces deux agents doivent être rapportés à une seule et même cause, surtout si l'on observe qu'en général les rayons lumineux sont accompagnés de rayons calorifiques. Toutefois, l'identité n'est pas complète, car on connaît plusieurs substances qui peuvent luire dans l'obscurité sans dégager de chaleur, ou, si elles en dégagent, ce n'est qu'en quantité inappréciable aux instruments thermométriques les plus sensibles. On a nommé *phosphorescents* les corps qui sont ainsi lumineux dans l'obscurité, parce que cette propriété est surtout apparente dans le phosphore.

Il est des cas où la phosphorescence est accompagnée d'une action chimique lente ; c'est ce qui a lieu dans le phosphore, dans certaines substances végétales ou animales, par exemple, dans les bois en décomposition, chez certains poissons en putréfaction, et surtout chez les harengs. Dans d'autres cas, la phosporescence est développée par l'effet d'une température élevée : par exemple, si l'on chauffe à 300 ou 400 degrés du spath fluor en poudre, il devient tout à coup lumineux et répand une lueur bleuâtre assez vive. Certaines substances deviennent lumineuses sous l'influence de la lumière solaire. C'est ainsi que le diamant et plusieurs autres minéraux, après avoir été exposés aux rayons du soleil pendant quelque temps, paraissent ensuite lumineux lorsqu'on les porte dans l'obscurité. Le spath fluor, le diamant, le marbre blanc, peuvent aussi acquérir la phosphorescence par l'action successive de plusieurs décharges d'une puissante batterie électrique. Enfin, la phosphorescence est très-intense chez plusieurs insectes, notamment chez le fulgore (porte-lanterne) et chez le lampyre (ver luisant). L'éclat de leur lumière varie sous l'empire de leur volonté.

Dans beaucoup de contrées, et surtout dans les régions tropicales, la mer est souvent couverte d'une lumière phosphorescente assez vive qui est due à des zoophytes d'une extrême petitesse. Ces animalcules répandent une matière lumineuse si subtile, que MM. Quoy et Gaimard, pendant un voyage sous l'équateur, en ayant placé deux dans un bocal rempli d'eau, le liquide devint immédiatement lumineux dans toute sa masse.

Se fondant sur ce que, dans un grand nombre de cas, les causes qui produisent la phosphorescence sont les mêmes que celles qui développent de l'électricité, et sur ce que la lumière électrique faible a une grande ressemblance avec celle des corps phosphorescents, M. Becquerel pense que la phosphorescence doit être rapportée à une cause électrique.

CHAPITRE VIII

DOUBLE RÉFRACTION, INTERFÉRENCES, POLARISATION.

505. **Double réfraction.** — On a déjà vu (426) que la *double réfraction* est la propriété que possèdent un grand nombre de cristaux de donner naissance, par un seul rayon incident, à deux rayons réfractés, d'où il résulte que lorsqu'on regarde un objet au travers de ces cristaux, on le voit double. La double réfraction a d'abord été observée par Bartholin, en 1647 ; mais c'est Huyghens qui, le premier, en 1673, en donna une théorie complète.

Les cristaux qui possèdent la double réfraction sont dits *biréfringents*. Cette propriété s'observe, à des degrés inégaux, dans tous les cristaux qui n'appartiennent point au système cubique. Les corps cristallisés dans ce système, et ceux qui sont privés de cristallisation, comme le verre, ne possèdent pas la double réfraction, mais peuvent l'acquérir accidentellement, quand on les comprime inégalement, ou par la *trempe*, c'est-à-dire par le refroidissement après avoir été chauffés. Les liquides et les gaz ne sont jamais biréfringents. De toutes les substances, celle qui présente le phénomène de la double réfraction d'une manière plus apparente, est le spath d'Islande, ou chaux carbonatée.

Fresnel a expliqué la double réfraction par une inégale densité de l'éther (395) dans les cristaux biréfringents ; d'où résulte une vitesse du mouvement vibratoire plus rapide dans une certaine direction qui est déterminée par l'état moléculaire du cristal.

Cette hypothèse se trouve confirmée par la propriété qu'acquiert le verre de devenir biréfringent par la trempe et par la compression (533).

506. Cristaux à un axe. — Dans un cristal doué de la double réfraction, il y a toujours une ou deux directions suivant lesquelles on n'observe que la réfraction simple, c'est-à-dire suivant lesquelles on ne voit qu'une image des objets. Ces directions se nomment *axes optiques*, ou *axes de double réfraction*. Toutefois cette dernière dénomination est impropre, car c'est précisément dans la direction de ces axes que la double réfraction n'a pas lieu.

On nomme *cristaux à un axe* ceux qui ne présentent qu'une direction où la lumière ne se bifurque pas, et *cristaux à deux axes* ceux qui en présentent deux.

Les cristaux à un axe dont l'emploi est le plus fréquent dans les instruments d'optique, sont le spath d'Islande, le quartz et la tourmaline. Le spath a la forme d'un rhomboèdre dont les faces sont inclinées de 105° 5′ (fig. 340). Les faces, au nombre de six, sont des rhombes ou losanges qui se réunissent, trois par trois, par leurs angles obtus, aux extrémités d'une droite *ab* qui est l'*axe de cristallisation*.

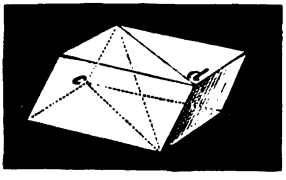


Fig. 340.

M. Brewster a constaté cette loi générale, dans les cristaux à un axe, que l'*axe de double réfraction coïncide toujours avec l'axe de cristallisation*.

On nomme *section principale* d'un cristal à un axe, le plan qui, passant par l'axe optique, est perpendiculaire à une face soit naturelle, soit artificielle du cristal.

507. Rayon ordinaire et rayon extraordinaire. — Des deux rayons réfractés auxquels donnent naissance les cristaux à un axe, l'un suit toujours les lois de la réfraction simple (427), mais l'autre n'est pas soumis à ces lois, c'est-à-dire que le rapport entre le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction n'est pas constant, et que le plan de réfraction ne coïncide pas avec le plan d'incidence. Le premier de ces rayons est dit le *rayon ordinaire*, et l'autre le *rayon extraordinaire*. Les images qui leur correspondent se désignent elles-mêmes sous les noms d'*image ordinaire* et d'*image extraordinaire*.

Le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire ont des indices différents; dans certains cristaux, c'est l'indice du rayon ordinaire qui est le plus grand; dans d'autres c'est l'indice du rayon extraordinaire. Fresnel a nommé les premiers *cristaux négatifs* et les derniers *cristaux positifs*. Le spath d'Islande, la tourmaline, le saphir, le rubis, l'émeraude, le mica, le prussiate de potasse, le phosphate de chaux sont négatifs. Le quartz, le zircon, la glace, l'apophyllite à un seul axe, sont positifs. La classe des cristaux négatifs est beaucoup plus nombreuse que celle des cristaux positifs.

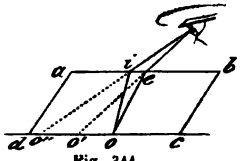


Fig. 341.

La figure 341 montre la marche des rayons dans le phénomène de la double réfraction, le parallélogramme *abcd* représentant une coupe principale d'un rhomboèdre de spath d'Islande. Celui-ci étant posé sur un carton blanc, on regarde, au travers, un point noir *o* tracé sur le carton. Le rayon incident parti du point *o* se divise en deux rayons *oi* et *oe*, qui, se réfractant inégalement à l'émergence, donnent à l'œil deux images *o'* et *o''*.

Si l'on tourne le rhomboèdre sur lui-même en le tenant toujours appliqué sur le

carton, une des images reste fixe, c'est l'image ordinaire, tandis que l'image extraordinaire tourne autour de la première, ce qui indique que le plan du rayon réfracté se déplace par rapport au plan d'incidence, et, par conséquent, que le rayon extraordinaire ne suit pas les lois de la réfraction simple.

508. **Lois de la double réfraction dans les cristaux à un axe.** — Le phénomène de la double réfraction, dans les cristaux à un axe, est soumis aux lois suivantes :

1° Le rayon ordinaire, quel que soit son plan d'incidence, suit toujours les deux lois générales de la réfraction simple (427).

2° Dans toute section perpendiculaire à l'axe, le rayon extraordinaire suit aussi ces deux lois comme le rayon ordinaire, mais son indice de réfraction n'est pas le même que celui de ce dernier rayon : de là la distinction en *indice ordinaire* et en *indice extraordinaire*.

3° Dans toute section principale, le rayon extraordinaire ne suit que la seconde loi de la réfraction; c'est-à-dire que les plans d'incidence et de réfraction coïncident, mais que le rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction n'est pas constant.

4° La vitesse de la lumière dans un cristal n'étant pas la même pour le rayon ordinaire que pour le rayon extraordinaire, la différence des carrés de ces deux vitesses est proportionnelle au carré du sinus de l'angle que le rayon extraordinaire fait avec l'axe.

Cette dernière loi est la traduction d'une formule empirique donnée par M. Biot pour lier entre elles les vitesses des deux rayons. Elle découle aussi de formules auxquelles Fresnel fut conduit par des considérations purement théoriques, et qui offrent cela de remarquable qu'on peut en déduire la formule de M. Biot.

Huyghens, qui, le premier, a donné une théorie complète de la double réfraction fondée sur le système des ondulations, a fait connaître une construction géométrique très-remarquable, à l'aide de laquelle on peut, dans toutes ses positions par rapport à l'axe, construire le rayon réfracté, quand on connaît son incidence; mais la théorie de Huyghens fut rejetée par les physiciens jusqu'à ce que Malus en eût établi l'exactitude par de nombreuses expériences.

509. **Lois de la double réfraction dans les cristaux à deux axes.** — Les cristaux à deux axes sont très-nombreux; de ce genre sont les sulfates de nickel, de magnésie, de baryte, de potasse, de fer, le sucre, le mica, la topaze du Brésil. Dans ces différents cristaux l'angle des deux axes prend des valeurs très-différentes, car il varie depuis 3 jusqu'à 90 degrés.

Fresnel a découvert par la théorie et démontré par l'expérience que dans les cristaux à deux axes, ni l'un ni l'autre des rayons réfractés ne suivent les lois de la réfraction simple; mais en appelant *ligne moyenne* et *ligne supplémentaire* les lignes qui divisent l'angle des deux axes et son supplément en deux parties égales, il a trouvé que, dans toute section perpendiculaire à la ligne moyenne, un des rayons réfractés suit les lois ordinaires de la réfraction, et que, dans toute section perpendiculaire à la ligne supplémentaire, c'est l'autre rayon qui suit ces lois.

On verra bientôt, dans les appareils de polarisation, de nombreuses applications de la double réfraction du spath d'Islande. Cette propriété a été aussi utilisée dans la lunette micrométrique de Rochon, appareil qui sert à mesurer le diamètre apparent des corps, et à l'aide duquel on peut déterminer la distance d'un objet quand sa grandeur est connue.

* DIFFRACTION, INTERFÉRENCES ET ANNEAUX COLORÉS.

510. **Diffraction et franges.** — La *diffraction* est une modification que subit la lumière quand elle rase le contour d'un corps, ou quand elle traverse une petite ouverture, modification en vertu de laquelle les rayons lumineux paraissent s'infléchir et pénétrer dans l'ombre. Pour observer le phénomène de la diffraction, on fait pénétrer un faisceau de lumière solaire par une ouverture très-petite pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, et on le reçoit sur une lentille convergente L à court foyer (fig. 342). Un verre coloré en rouge est fixé à l'ouverture de la chambre noire, et ne laisse passer que de la lumière rouge. Un écran opaque *e*, à bord mince,

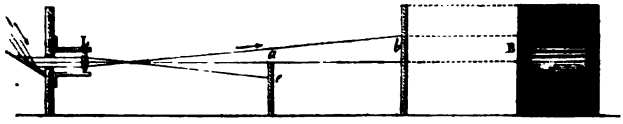


Fig. 342.

et placé derrière la lentille, au delà de son foyer, intercepte une moitié du cône lumineux, tandis que l'autre va se projeter sur un écran *b*, représenté de face en B. Or, on observe alors, en dedans de l'ombre géométrique limitée par la droite *ab*, une lumière rougeâtre assez vive, qui décroît d'intensité à mesure que les points de l'écran sont plus éloignés de la limite de l'ombre; et sur la partie de l'écran qui devrait être uniformément éclairée, on remarque des alternatives de franges obscures et de franges lumineuses, qui vont en s'affaiblissant graduellement et finissent par disparaître complétement.

Les diverses couleurs du spectre donnent naissance au même phénomène, mais avec cette différence que les franges sont d'autant plus étroites et, par conséquent, moins dilatées, que la lumière est moins réfrangible. Il résulte de cette dernière propriété que lorsqu'on expérimente avec de la lumière blanche, les franges de chaque couleur simple se trouvant séparées par leur inégale diffraction, celles qui se forment sur l'écran B sont irisés.

Si, au lieu d'interposer, entre la lentille L et l'écran *b*, les bords d'un corps opaque, on y place un corps opaque très-étroit, comme un cheveu, ou un fil métallique très-fin, non-seulement il y a encore des franges alternativement obscures et lumineuses des deux côtés de la portion de l'écran qui correspond à l'ombre géométrique du corps; mais dans cette ombre même on aperçoit les mêmes alternatives de bandes obscures et de bandes lumineuses. C'est-à-dire qu'il se produit alors des franges extérieures et des franges intérieures.

C'est le père Grimaldi, de Bologne, qui fit connaître, le premier, en 1663, le phénomène de la diffraction et des franges, mais sans en donner l'explication. Newton essaya d'expliquer le phénomène de la diffraction, dans le système de l'émission, en admettant une action répulsive exercée par les corps sur les rayons lumineux, ce qui n'expliquait pas les franges intérieures. Thomas Young expliqua le phénomène de la diffraction, dans le système des ondulations, en l'attribuant à l'interférence (511) des rayons directs avec les rayons réfléchis par les bords des corps opaques. Mais il résulterait de cette théorie que la formation des franges devrait dépendre de la nature des corps opaques dont la lumière rase les contours, ainsi que de leur degré de poli, ce qui est

contraire à l'observation. C'est Fresnel qui a expliqué, le premier, tous les phénomènes de la diffraction, en se fondant toujours sur la théorie des ondes lumineuses.

511. Interférences. — On nomme *interférence* une action mutuelle qu'exercent l'un sur l'autre deux rayons lumineux, lorsque, émis par une même source, ils se rencontrent sous un très-petit angle. Cette action peut s'observer très-simplement au moyen de l'expérience suivante : par deux ouvertures circulaires très-petites, de même diamètre, et peu distantes l'une de l'autre, on introduit, dans une chambre obscure, deux faisceaux de lumière homogène, de lumière rouge, par exemple, ce qui s'obtient en fixant aux deux ouvertures de la chambre noire des verres colorés en rouge, qui ne laissent passer que cette lumière. Les deux faisceaux formant après leur entrée dans la chambre noire, deux cônes lumineux qui vont se rencontrer à une certaine distance, on les reçoit un peu au delà de leur point de rencontre, sur un carton blanc, et on remarque alors, dans le segment commun aux deux disques qui se forment sur cet écran, des franges d'une obscurité remarquable, formant des alternatives de rouge et de noir. Mais si l'on ferme l'une des deux ouvertures, les franges disparaissent et sont remplacées par une teinte rouge à peu près uniforme. De ce que les franges obscures

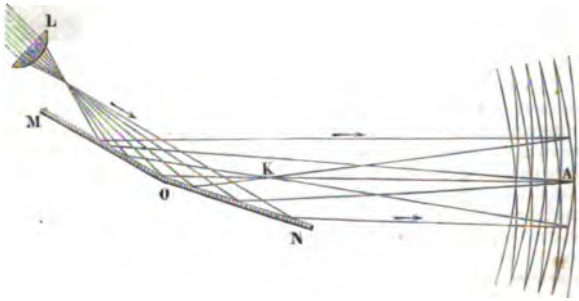


Fig. 343.

disparaissent quand on intercepte un des faisceaux, on conclut qu'elles sont le résultat de la rencontre des deux faisceaux qui se croisent obliquement.

Cette expérience est due à Grimaldi, qui en avait tiré cette conséquence remarquable, que de la lumière ajoutée à de la lumière produit de l'obscurité. Dans l'expérience décrite ci-dessus, il y a diffraction, car les rayons lumineux rasent les bords des ouvertures; mais, sans faire intervenir ce phénomène, on peut faire interférer deux faisceaux au moyen de l'appareil suivant, dû à Fresnel.

Deux miroirs plans M et N (fig. 343), de métal, sont disposés à côté l'un de l'autre, de manière à former un angle MON très-obtus. Une lentille hémicylindrique L, à court foyer, concentre, en avant de ces miroirs, un faisceau de lumière rouge introduit dans la chambre noire, lequel tombe en partie sur l'un des miroirs et en partie sur l'autre. Les ondes lumineuses, après s'être réfléchies, viennent se rencontrer sous un très-petit angle, comme le montre la figure, plus près du miroir N que du miroir M, et si on les reçoit alors sur un écran blanc, on observe, sur celui-ci, des bandes alternativement sombres et brillantes, parallèles à la ligne d'intersection des deux miroirs et symétriquement disposées des deux côtés du plan OKA qui passe par la ligne d'intersection des miroirs, et partage en deux parties égales l'angle que forment entre eux les rayons réfléchis.

Si l'on arrête la lumière qui tombe sur l'un des miroirs, les franges disparaissent : résultat identique à celui de l'expérience précédente.

Enfin, si l'on fait passer le faisceau déjà réfléchi par l'un des miroirs, au travers d'une lame de verre à faces parallèles, toutes les franges sont déplacées, à droite ou à gauche, d'une quantité qui augmente avec l'épaisseur de la lame. Cette dernière expérience montre que l'action mutuelle des rayons qui se rencontrent est modifiée par la substance qu'ils traversent, et on en a déduit que la lumière se propage moins vite dans le verre que dans l'air.

512. **Principe des interférences.** — Le phénomène des interférences, de même que celui de la diffraction, ne peut s'expliquer dans le système de l'émission; mais Fresnel en a donné une explication complète dans le système des ondulations. Dans ce système, les molécules de l'éther étant animées d'un mouvement de va-et-vient extrêmement rapide (395), on nomme *longueur d'ondulation* l'espace qu'embrassent l'aller et le retour de chaque molécule d'éther, et *demi-ondulation* l'allée ou le retour seul; en sorte qu'une ondulation complète se compose de deux demi-ondulations de sens contraire. Cela posé, lorsque deux systèmes d'ondulations de même longueur et de même intensité se propagent suivant une même direction, si l'un des systèmes est en avance ou en retard sur l'autre, juste d'un nombre pair de demi-longueurs d'ondulation, les deux systèmes s'ajoutent pour imprimer à l'éther un mouvement dans le même sens, et l'intensité de la lumière est doublée; mais si, au contraire, un système est en retard sur l'autre d'un nombre impair de demi-ondulations, les mouvements imprimés à l'éther se détruisent, et il en résulte de l'obscurité.

Telle est l'explication des franges sombres et lumineuses, observées dans les expériences de Fresnel et de Grimaldi. Les franges observées dans la diffraction se rapportent à la même cause.

Les deux expériences décrites ci-dessus (511) ayant été faites avec de la lumière rouge, les franges étaient alternativement noires et rouges; mais si on les répète avec de la lumière blanche, les franges sont irisées. Pour expliquer cette coloration, il faut remarquer que la largeur des franges varie avec chaque couleur simple : il en résulte que quand on fait interférer deux faisceaux de lumière blanche, les franges dues à chaque couleur se séparent, ce qui produit l'irisation qu'on observe. On voit que cette explication est la même que celle des couleurs dans la diffraction.

513. **Longueur des ondulations, cause des couleurs.** — En mesurant avec précision l'intervalle de deux franges consécutives, dans le phénomène des interférences, Fresnel en a déduit par le calcul la longueur des ondulations de l'éther, et il a reconnu que cette longueur n'est pas la même pour tous les rayons colorés, mais va en augmentant du violet au rouge, comme le montre le tableau suivant :

Couleurs simples.	Longueur moyenne des ondulations en millionièmes de millimètres.
Violet	423
Indigo	449
Bleu	475
Vert	512
Jaune	551
Orangé	583
Rouge	620

La vitesse de la lumière, par seconde, étant de 77000 lieues de 4000 mètres (401), c'est-à-dire de 308 millions de mètres, on aura le nombre d'ondulations correspondant à chaque couleur, par seconde, en cherchant combien de fois la longueur d'ondulation

correspondante et contenue dans le nombre 308 millions, c'est-à-dire en divisant ce dernier par les nombres du tableau ci-dessus, ce qui donne, pour le rayon violet, plus de 728 millions de millions d'ondulations par seconde, et, pour le rayon rouge, plus de 496 millions de millions. A chaque couleur simple correspondant ainsi un nombre d'ondulations qui lui est propre, on voit que la théorie des ondulations conduit à admettre que c'est le nombre de vibrations que font les molécules de l'éther, en un temps donné, qui détermine la nature des couleurs, de même que c'est le nombre des ondes sonores qui produit les différents sons.

514. **Couleurs des lames minces, anneaux de Newton.** — Tous les corps diaphanes, solides, liquides ou gazeux, lorsqu'ils sont réduits en lames suffisamment minces, paraissent colorés de nuances extrêmement vives, surtout par reflexion. Les cristaux qui se clivent en feuilles très-minces, comme le mica, le gypse, présentent ce phénomène; il en est de même de la nacre et du verre soufflé en boule très-mince. Une goutte d'huile étalée rapidement sur une grande masse d'eau présente toutes les nuances du spectre dans un ordre constant. Une bulle de savon paraît blanche d'abord; mais à mesure qu'on l'enfle, on voit apparaître de brillantes teintes

Fig. 344.

Fig. 345.

risées, surtout à la partie supérieure où l'enveloppe liquide qui forme la bulle est plus mince. Ces couleurs se disposent en zones concentriques horizontales autour du sommet, qui devient noir au moment où il n'a plus l'épaisseur suffisante pour réfléchir la lumière, et la bulle crève alors subitement.

Newton, qui, le premier, étudia le phénomène des anneaux colorés dans les bulles de savon, voulant constater la relation qui existe entre l'épaisseur de la lame mince, la couleur des anneaux et leur étendue, produisait ceux-ci au moyen d'une couche d'air interposée entre deux verres, l'un plan, l'autre convexe et à très-long foyer (fig. 344). Les deux surfaces étant essuyées et exposées devant une fenêtre, à la lumière du jour, de manière à les voir par réflexion, on aperçoit, au point de contact, une tache noire entourée d'anneaux colorés, au nombre de six ou sept, dont les teintes s'affaiblissent graduellement (fig. 345). Si les verres sont vus par transmission, le centre des anneaux est blanc, et les couleurs de chacun d'eux sont exactement complémentaires de celles des anneaux par réflexion.

Avec une lumière homogène, la couleur rouge, par exemple, les anneaux sont successivement noirs et rouges, et d'un diamètre d'autant moindre que la couleur est plus réfrangible; mais avec de la lumière blanche, les anneaux sont colorés des différentes couleurs du spectre, ce qui provient de ce que les anneaux des différentes couleurs simples ayant des diamètres différents, les anneaux ne se superposent pas, mais se séparent plus ou moins.

Si la distance focale de la lentille est de 3 à 4 mètres, les anneaux peuvent s'observer à l'œil nu; mais si le foyer est plus rapproché il faut regarder les anneaux avec une loupe.

En calculant l'épaisseur de la couche d'air comprise entre la lame et la lentille, Newton a trouvé que, *pour les anneaux obscurs, ces épaisseurs sont entre elle*

comme la suite des nombres pairs 0, 2, 4, 6.....; et que, *pour les anneaux brillants, ces mêmes épaisseurs varient comme la suite des nombres impairs* 1, 3, 5, 7.....; ces rapports étant indépendants de la courbure de la lentille et de la couleur des rayons qui la traversent. Newton a trouvé en outre que l'épaisseur de la couche d'air interposée diminuant à mesure que la réfrangibilité augmente, cette épaisseur est de 161 millionièmes de millimètre pour le rouge extrême de premier ordre, c'est-à-dire correspondant au premier anneau brillant, tandis que pour le violet extrême cette épaisseur n'est plus que de 101 millionièmes de millimètre. Enfin, pour des anneaux de même ordre, c'est-à-dire de même rang, les diamètres sont d'autant plus grands que la couleur simple qui tombe sur la lentille est moins réfrangible.

La coloration des lames minces et des anneaux de Newton est un phénomène d'interférence qui résulte de ce que les rayons qui se sont réfléchis sur la seconde surface de la lame interfère avec ceux que la première surface a réfléchis. Quant aux anneaux vus par réfraction, ils résultent de l'interférence des rayons transmis directement avec les rayons qui ne sont transmis qu'après deux réflexions intérieures sur les faces de la lame (409).

515. Phénomène des réseaux. — On nomme *réseau*, en optique, une série de raies opaques et de raies transparentes très-rapprochées les unes des autres. Tels sont les traits parallèles qu'on grave au diamant, sur verre, pour former les micromètres (465). Les traits sont ici la partie opaque du réseau. Si l'on reçoit, par transmission, la lumière d'une bougie à travers un pareil réseau contenant 100 traits par millimètre, on aperçoit une suite de petits spectres ayant le rouge en dehors et le bleu en dedans. La même chose a lieu si l'on regarde la flamme d'une bougie à travers les barbes d'une plume placée près de l'œil. Cette coloration est encore un phénomène d'interférence.

POLARISATION.

516. Polarisation par réflexion. — La *polarisation* est une modification particulière des rayons lumineux, en vertu de laquelle, une fois réfléchis ou réfractés, ils deviennent incapables de se réfléchir ou de se réfracter de nouveau dans certaines directions. Le nom de polarisation a été adopté pour caractériser ces nouvelles propriétés de la lumière, parce que, pour les expliquer, dans la théorie de l'émission, on admet que les molécules lumineuses ont des pôles et des axes qui, par la réflexion sous un certain angle, se tournent tous dans une même direction. La polarisation a été découverte en 1810 par Malus, physicien français, mort deux ans plus tard.

La lumière se polarise par réflexion ou par réfraction. Réfléchie sur une glace de verre noir, la lumière se polarise lorsque la réflexion se produit sous un angle de 35° 25′ avec la glace. Voici quelques-unes des propriétés que possède alors le rayon polarisé.

1° Ce rayon n'éprouve aucune réflexion en tombant sur une seconde lame de verre, sous le même angle de 35° 25′, si le plan d'incidence sur cette seconde lame est perpendiculaire au plan d'incidence sur la première, tandis qu'il se réfléchit plus ou moins sous les autres incidences.

2° Transmis au travers d'un prisme biréfringent (520, 3°), il ne donne qu'une image, si la section principale est parallèle ou perpendiculaire au plan d'incidence, tandis que dans toute autre position par rapport à ce plan, il donne deux images plus ou moins intenses.

3° Il ne peut pas se transmettre au travers d'une plaque de tourmaline (520, 2°) dont l'axe de cristallisation est parallèle au plan d'incidence, et se transmet au con-

traire d'autant plus facilement que l'axe de la tourmaline approche davantage de la direction perpendiculaire à ce plan.

Tous les corps peuvent, comme le verre, polariser la lumière par réflexion, mais plus ou moins complétement et sous des angles d'incidence inégaux. Le marbre noir, par exemple, polarise complétement la lumière, tandis que le diamant, le verre ordinaire, le verre d'antimoine ne la polarisent que partiellement. De tous les corps, ce sont les métaux qui ont le plus faible pouvoir polarisant.

517. **Angle et plan de polarisation.** — L'*angle de polarisation* d'une substance est l'angle que doit faire le rayon incident avec une surface plane et polie de cette substance, pour que le rayon réfléchi soit polarisé le plus complétement possible. Pour l'eau, cet angle est de 37° 15′; pour le verre, de 35° 25′; pour le quartz, de 32° 28′; pour le diamant, de 22°; il est de 33° 30′ pour l'obsidienne, espèce de verre noir naturel qui polarise très-bien la lumière.

M. Brewster a fait connaître, sur l'angle de polarisation, la loi suivante, remarquable par sa simplicité : *L'angle de polarisation est l'angle d'incidence pour lequel le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté.* Toutefois, cette loi n'est pas applicable à la lumière réfléchie par les cristaux biréfringents.

Dans la polarisation par réflexion, on nomme *plan de polarisation* le plan de réflexion dans lequel la lumière se trouve polarisée; ce plan coïncide avec le plan d'incidence et contient, par conséquent, l'angle de polarisation. C'est dans ce plan que, réfléchie une première fois, la lumière ne peut se réfléchir sous l'angle de polarisation dans un plan perpendiculaire au premier; c'est encore dans ce plan qu'elle n'est pas transmissible au travers d'une tourmaline dont l'axe est parallèle au plan. Tout rayon polarisé par réfraction possède aussi un plan de polarisation, c'est-à-dire un plan dans lequel il présente les propriétés qu'on vient d'énoncer.

518. **Polarisation par simple réfraction.** — Quand un rayon de lumière non polarisée tombe sur une lame de verre à faces parallèles, sous l'angle de polarisation, il n'est qu'en partie réfléchi; l'autre partie traverse la lame en se réfractant, et la lumière transmise est polarisée partiellement dans un plan perpendiculaire au plan de réflexion, et, par conséquent, au plan de polarisation de la lumière qui a été polarisée par réflexion. Arago a observé, en outre, que le faisceau réfléchi et le faisceau réfracté contiennent une égale quantité de lumière polarisée, et que la réunion de ces deux faisceaux donne de la lumière naturelle. On peut donc regarder la lumière ordinaire comme formée de deux faisceaux égaux polarisés à angle droit.

Une seule lame de verre ne polarisant jamais complétement la lumière, on peut en réunir plusieurs qu'on superpose, et qui, par des réflexions et des réfractions successives, produisent un effet plus complet. Des lames de verre ainsi réunies forment ce qu'on appelle une *pile de glaces*, appareil qu'on utilise fréquemment pour obtenir un faisceau de lumière polarisée.

519. **Polarisation par double réfraction.** — La lumière se polarise par double réfraction, lorsqu'elle traverse un cristal de spath d'Islande ou de toute autre substance biréfringente; les deux faisceaux, distincts à leur émergence, sont tous les deux polarisés entièrement, mais dans des plans différents, qui sont exactement ou très-sensiblement perpendiculaires entre eux. Pour le démontrer, on regarde, au travers d'un rhomboèdre de spath d'Islande, un point noir tracé sur une feuille de papier. A l'œil nu, on aperçoit deux images qui présentent le même éclat; mais si l'on interpose une tourmaline qu'on fait tourner dans son propre plan, chaque image disparaît et reparaît deux fois dans une révolution de la tourmaline, ce qui fait voir que les deux rayons émergents sont polarisés dans les plans perpendiculaires entre eux (520, 2°). L'image ordinaire s'éteint au moment où l'axe de la tourmaline est parallèle à la section principale de la surface d'incidence, et l'image extraordinaire au moment où

ce même axe est perpendiculaire à cette même section : on conclut de là que le faisceau ordinaire est polarisé dans le plan de la section principale, et le faisceau extraordinaire dans un plan perpendiculaire à cette section.

520. Polariscopes ou analyseurs. — On nomme *polariscopes* ou *analyseurs* de petits instruments qui servent à reconnaître quand la lumière est polarisée, et à déterminer son plan de polarisation. Les analyseurs les plus usités sont la glace de verre noir, la tourmaline en plaque mince, le prisme biréfringent, le prisme de Nicol, et les piles de glaces décrites plus haut (518).

1° *Glace noire.* — On verra ci-dessous, dans l'appareil que représente la figure 349, qu'une glace noire *m* fait reconnaître si la lumière est polarisée, en refusant de la réfléchir sous l'angle de polarisation, quand le plan d'incidence sur cette glace est perpendiculaire au plan de polarisation; la glace *m* est donc un analyseur.

2° *Tourmaline.* — L'analyseur le plus simple est une lame de tourmaline brune taillée parallèlement à son axe de cristallisation. Ce minéral, qui est biréfringent, a la propriété de ne laisser passer que la lumière naturelle, et la lumière polarisée dans un plan perpendiculaire à son axe; mais il se comporte comme un corps opaque à l'égard de la lumière polarisée dont le plan de polarisation est parallèle à cet axe. Pour se servir de cet analyseur, on l'interpose entre l'œil et le faisceau lumineux qu'on veut observer, puis on tourne lentement la tourmaline dans son propre plan : si alors le faisceau présente toujours la même intensité, il ne contient pas de lumière polarisée; mais si l'éclat décroît et croît successivement, le faisceau contient d'autant plus de lumière polarisée qu'il éprouve des variations d'intensité plus considérables. Au moment du minimum, le plan de polarisation est déterminé par l'axe de la tourmaline et par le rayon visuel. C'est le rayon extraordinaire qui passe dans une tourmaline taillée parallèlement à l'axe; le rayon ordinaire est complétement absorbé, du moins si la tourmaline est suffisamment colorée.

3° *Prisme biréfringent.* — On construit, avec le spath d'Islande, des prismes biréfringents qui sont employés comme analyseurs dans plusieurs instruments d'optique, notamment dans l'appareil de M. Biot pour étudier la polarisation circulaire (fig. 352). Il est nécessaire que ces prismes soient achromatisés, car lorsque la lumière qui les traverse n'est pas simple, elle est décomposée par la réfraction. Pour cela, on accole au prisme de spath un second prisme de verre, d'un angle tel qu'en réfractant la lumière en sens contraire, il détruit à peu près complétement l'effet de la dispersion. On obtient le maximum d'écart entre l'image ordinaire et l'image extraordinaire, en taillant le prisme biréfringent de manière que ses arêtes soient parallèles ou perpendiculaires à l'axe optique du cristal.

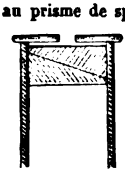


Fig. 346.

Le prisme biréfringent étant fixé à l'extrémité d'un tube de cuivre (fig. 346), on reconnaît qu'un faisceau lumineux qu'on fait passer dans ce tube est complétement polarisé, quand, en tournant le tube sur lui-même, on trouve, pendant une révolution complète, quatre positions rectangulaires où l'on n'aperçoit qu'une image. C'est l'image ordinaire qui disparaît quand le plan de la section principale est perpendiculaire au plan de polarisation, et c'est l'image extraordinaire qui s'éteint toutes les fois que le plan de polarisation coïncide avec la section principale. Dans toutes les autres positions que prend le prisme biréfringent, l'intensité relative des images varie. On voit, en même temps, que le prisme biréfringent peut servir à déterminer la direction du plan de polarisation, puisqu'il suffit de chercher la position de la section principale du prisme pour laquelle, le faisceau incident étant normal, l'image extraordinaire s'éteint.

4° *Prisme de Nicol.* — Le prisme de Nicol est l'analyseur le plus précieux, parce

qu'il est tout à fait incolore, qu'il polarise complétement la lumière, et qu'il ne transmet qu'un seul rayon polarisé dans la direction de son axe.

Pour le construire, on prend un rhomboèdre de spath d'Islande de 20 à 30 millimètres de hauteur environ, sur 8 à 9 de largeur, et on le coupe en deux suivant un plan perpendiculaire au plan des grandes diagonales des bases et passant par les sommets obtus les plus rapprochés l'un de l'autre, puis on rejoint les deux moitiés dans

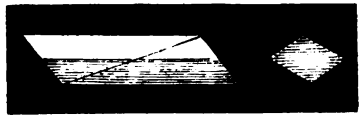


Fig. 347.

le même ordre avec du baume de Canada. Le parallélipipède ainsi construit constitue le prisme de Nicol (fig. 347).

L'indice de réfraction du baume de Canada étant plus petit que l'indice ordinaire du spath d'Islande, mais plus grand que son indice extraordinaire, il en résulte qu'un rayon lumineux SC (fig. 348) pénétrant dans le prisme, le rayon ordinaire éprouve sur la surface *ab* la réflexion totale, et prend la direction CdO, tandis que le rayon extraordinaire Ce passe seul ; c'est-à-dire que le prisme de Nicol, de même que la tourmaline, ne laisse passer que le rayon extraordinaire. Il peut donc servir d'ana-

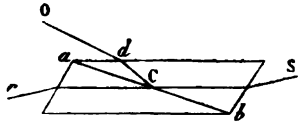


Fig. 348.

lyseur comme la tourmaline. On l'utilise aussi pour obtenir un faisceau de lumière blanche polarisée. Le prisme biréfringent sert au même usage.

621. Appareil de Noremberg. — M. Noremberg a imaginé un appareil simple et peu dispendieux, à l'aide duquel on peut répéter la plupart des expériences relatives à la lumière polarisée. Cet appareil se compose de deux colonnes *b* et *d* (fig. 349), de cuivre, qui soutiennent une glace non étamée *n*, mobile autour d'un axe horizontal. Un petit cercle gradué *c* indique l'angle de cette glace avec la verticale. Entre les pieds des deux colonnes est une glace étamée *p*, fixe et horizontale. A leur extrémité supérieure, ces mêmes colonnes supportent un plateau gradué *i* dans lequel peut tourner un disque circulaire *o*. Celui-ci, au centre duquel est une ouverture quadrangulaire, porte une glace de verre noir *m*, faisant, avec la verticale, un angle égal à l'angle de polarisation. Enfin, un disque annulaire *k* peut se fixer, par une vis de pression, à différentes hauteurs sur les colonnes. Un deuxième anneau *a*, soutenu par le premier, peut prendre, autour d'un axe, différentes inclinaisons, et porte un écran noir *e*, percé à son centre d'une ouverture circulaire.

Cela posé, la glace *n* faisant, avec la verticale, un angle de 35° 25′, c'est-à-dire égal à l'angle de polarisation du verre, les rayons lumineux S*n*, qui rencontrent cette glace sous cet angle, se polarisent (516) en se réfléchissant dans la direction *np*, vers la glace *p* qui les renvoie dans la direction *par*. Après avoir traversé la glace *n*, le faisceau polarisé tombe sur la glace noire *m* sous un angle de 35° 25′, puisque cette glace

fait précisément le même angle avec la verticale. Or, si l'on fait mouvoir horizontalement le disque *o* auquel est fixée la glace *m*, celle-ci se déplace en conservant toujours la même inclinaison, et on remarque deux positions où elle ne réfléchit pas le faisceau incident *nr*; c'est lorsque le plan d'incidence, sur cette glace, est perpendiculaire au plan d'incidence *Snp* sur la glace *n*. Telle est la position représentée dans le dessin ci-dessous. Dans toute autre position, le faisceau polarisé est réfléchi par la

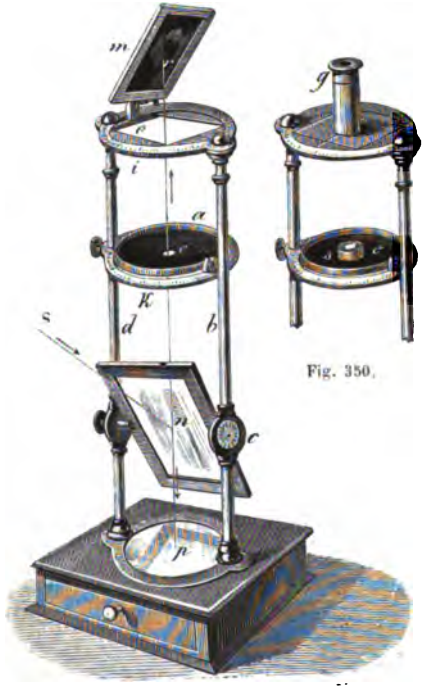


Fig. 350.

Fig. 349.

glace *m* en quantité variable, et le maximum de lumière réfléchie a lieu lorsque les plans d'incidence, sur les glaces *m* et *n*, sont parallèles entre eux. Si la glace *m* fait, avec la verticale, un angle plus grand ou plus petit que 35° 25′, le faisceau polarisé est toujours réfléchi dans toutes les positions du plan d'incidence.

Quand, au lieu de recevoir la lumière polarisée sur la glace noire *m*, on la reçoit sur un prisme biréfringent (520, 3°) placé dans un tube *g* (fig. 350), on n'obtient qu'une image toutes les fois que le plan de la section principale du prisme coïncide avec le plan de polarisation sur la glace *n*, et c'est alors le rayon ordinaire qui est transmis. On ne voit encore qu'une image quand le plan de la section principale est perpendiculaire au plan de polarisation, et c'est alors le rayon extraordinaire qui

passe. Pour toute autre position du prisme biréfringent, on voit deux images dont l'intensité varie avec la position de la section principale.

Enfin, si l'on substitue une tourmaline au prisme réfringent et qu'on la fasse tourner sur elle-même, le faisceau polarisé s'éteint complétement lorsque l'axe de la tourmaline est parallèle au plan d'incidence *Sap*.

Les différentes propriétés de la lumière polarisée énoncées précédemment (516, 1°, 2° et 3°) se trouvent donc ainsi démontrées. On va voir d'autres applications de l'appareil de Noremberg à l'étude de la polarisation rotatoire dans le quartz et à l'observation des couleurs de la lumière polarisée.

POLARISATION ROTATOIRE.

522. Rotation du plan de polarisation. — Lorsqu'un rayon polarisé traverse une plaque de quartz taillée perpendiculairement à l'axe de cristallisation, ce rayon est encore polarisé à l'émergence, mais non plus dans le même plan de polarisation qu'avant son passage dans le quartz. Avec certains échantillons, le nouveau plan est dévié à gauche de l'ancien, avec d'autres il l'est à droite. C'est à ce phénomène qu'on a donné le nom de *polarisation rotatoire*. Il a été observé d'abord par Seebeck et par Arago; mais il a été étudié surtout par M. Biot, qui a fait connaître les lois suivantes :

1° La rotation du plan de polarisation n'est pas la même pour les diverses couleurs simples, et elle est d'autant plus grande que ces couleurs sont plus réfrangibles.

2° Pour une même couleur simple et pour des plaques d'un même cristal, la rotation est proportionnelle à l'épaisseur.

3° Dans la rotation de droite à gauche ou de gauche à droite, la même épaisseur imprime sensiblement la même rotation.

On a nommé *dextrogyres* les substances qui tournent à droite : tels sont le sucre de canne en dissolution dans l'eau, l'essence de citron, la solution alcoolique de camphre, la dextrine et l'acide tartrique; et on a appelé *lévogyres* les substances qui tournent à gauche, comme l'essence de térébenthine, l'essence de laurier, la gomme arabique.

523. Coloration produite par la polarisation circulaire. — Quand on regarde, avec un prisme biréfringent, une lame de quartz de quelques millimètres d'épaisseur, taillée perpendiculairement à l'axe et traversée par un faisceau de lumière polarisée, on observe deux images vivement colorées, dont les teintes sont complémentaires, car en se recouvrant par leurs bords, les deux images donnent du blanc (fig. 351). En tournant alors le prisme à droite ou à gauche, les deux images changent de teintes et prennent successivement toutes les couleurs du spectre, tout en continuant à être complémentaires.

Fig. 351.

Ce phénomène est une conséquence de la première loi sur la polarisation circulaire (522, 1°). En effet, M. Biot ayant reconnu que le quartz fait tourner le plan de polarisation du rayon rouge de près de 17° 30′, et celui du rayon violet de 44° 5′, il résulte de la grande différence de ces deux angles que, lorsque la lumière polarisée qui a traversé la plaque de quartz ci-dessus, émerge, les diverses couleurs simples qu'elle renferme sont polarisées dans des plans différents. Par conséquent, lorsque le faisceau ainsi transmis par le quartz est reçu à travers un prisme biréfringent qui le décompose en deux autres polarisés à angles droits (519), les diverses couleurs simples se partagent inégalement entre les deux images ordinaires et extraordinaires fournies

par le prisme, d'où il résulte que ces images sont nécessairement complémentaires, les couleurs qui manquent à l'une se retrouvant dans l'autre.

Ces phénomènes de coloration s'observent très-bien au moyen de l'appareil de Noremberg (fig. 349). Pour cela, on place sur l'écran *e* (fig. 350) une plaque de quartz *s*, taillée perpendiculairement à l'axe et fixée dans un disque de liége; puis, la glace *n* (fig. 349) étant inclinée de manière à faire passer dans le quartz un faisceau polarisé, on regarde au travers d'un prisme réfringent *g* (fig. 350), et en faisant tourner le tube dans lequel est ce prisme, on observe les images complémentaires fournies par le passage, dans le quartz, de la lumière polarisée (fig. 351).

524. Pouvoir rotatoire des liquides. — Le quartz est la seule substance solide dans laquelle on ait observé la polarisation circulaire; mais M. Biot a retrouvé la même propriété dans un grand nombre de liquides et de dissolutions. Le même savant a observé, en outre, que le déplacement du plan de polarisation peut faire connaître des différences de composition dans des corps où l'on n'en distingue aucune par l'analyse chimique. Par exemple, le sucre de raisin fait tourner à gauche le plan de polarisation, tandis que le sucre de canne le fait tourner à droite, quoique la composition chimique de ces deux sucres soit la même.

M. Biot a trouvé que le pouvoir rotatoire des liquides est beaucoup moindre que celui du quartz. Dans le sirop de sucre de canne concentré, qui est un des liquides qui possèdent le pouvoir rotatoire au plus haut degré, ce pouvoir est trente-six fois moindre que dans le quartz, d'où il résulte qu'on est forcé d'opérer sur des colonnes liquides d'une assez grande longueur, 20 centimètres environ.

La figure 352 représente l'appareil qui a été adopté par M. Biot pour mesurer le pouvoir rotatoire des liquides. Dans une gouttière de cuivre *g*, fixée à un support *r*, est un tube *d* de 20 centimètres de long, où est renfermé le liquide sur lequel on veut expérimenter. Ce tube, qui est en cuivre, est étamé intérieurement et fermé à ses deux extrémités par deux glaces à faces parallèles, fixées par deux viroles à vis. En *m* est une glace de verre noirci, faisant avec l'axe des tubes *b*, *d*, *a*, qui est le même pour tous les trois, un angle égal à l'angle de polarisation, d'où il résulte que la lumière réfléchie par la glace *m*, dans la direction *bda*, est polarisée. Au centre du cercle divisé *h*, dans le tube *a* et perpendiculairement à l'axe *bda*, est un prisme biréfringent achromatisé, qu'on peut tourner à volonté autour de l'axe de l'appareil, au moyen d'un bouton *n*. Celui-ci est fixé à une alidade *c*, qui porte un vernier et qui marque le nombre de degrés dont on tourne. Enfin, d'après la position du miroir *m*, le plan de polarisation *Sod* du faisceau réfléchi est vertical, et le zéro de la graduation sur le cercle *h* est dans ce plan.

Cela posé, avant qu'on ait placé le tube *d* dans la gouttière *g*, l'image extraordinaire fournie par le prisme biréfringent s'éteint toutes les fois que l'alidade *c* correspond au zéro de la graduation, parce qu'alors le prisme biréfringent se trouve tourné de manière que sa section principale coïncide avec le plan de polarisation (520, 3°). Il en est encore de même quand le tube *d* est plein d'eau ou de tout autre liquide *inactif*, comme l'alcool, l'éther, ce qui montre que le plan de polarisation n'a pas tourné. Mais si l'on remplit le tube d'une dissolution de sucre de canne ou de tout autre liquide *actif*, l'image extraordinaire reparaît, et, pour l'éteindre, il faut tourner l'alidade d'un certain angle à droite ou à gauche du zéro, suivant que le liquide est dextrogyre ou lévogyre, ce qui démontre que le plan de polarisation a tourné du même angle. Avec la dissolution de sucre de canne, la rotation a lieu vers la droite, et si, avec une même dissolution, on prend des tubes plus ou moins longs, on trouve que la rotation croît proportionnellement à la longueur, ce qui est conforme à la deuxième loi de M. Biot (522); enfin, si, avec un tube de longueur constante, on prend des dissolutions de plus en plus riches en sucre, on observe que la rotation

croît comme la quantité de sucre dissoute; d'où l'on voit que de l'angle de déviation on peut déduire l'analyse quantitative d'une dissolution.

Dans l'expérience qui vient d'être décrite, il importe d'opérer avec de la lumière simple, car les différentes couleurs du spectre possédant des pouvoirs rotatoires différents, il en résulte que la lumière blanche est décomposée en traversant un liquide actif, et que l'image extraordinaire ne disparaît complétement dans aucune position du prisme biréfringent; seulement, elle change de teinte. Pour obvier à cet inconvé-

Fig. 352. (h = 46).

nient, on place dans le tube *a*, entre l'œil et le prisme biréfringent, un verre coloré en rouge par l'oxyde de cuivre, lequel ne laisse sensiblement passer que la lumière rouge. L'image extraordinaire s'éteint donc alors toutes les fois que la section principale du prisme coïncide avec le plan de polarisation du faisceau rouge.

525. **Saccharimètre de M. Soleil.** — M. Soleil a utilisé la propriété rotatoire des liquides, découverte par M. Biot, pour construire un appareil destiné à analyser les substances saccharifères, d'où vient le nom de *saccharimètre* donné à cet appareil.

La figure 353 représente le saccharimètre fixé horizontalement sur son pied, et la figure 354 en donne une coupe longitudinale avec les modifications que lui a apportées M. Duboscq. Cet instrument, simple au point de vue pratique, ne laisse pas que d'être compliqué au point de vue théorique, car il suppose connus les principaux phénomènes de la réfraction et de la polarisation.

Le principe de cet appareil n'est pas l'amplitude de la rotation du plan de polarisation, comme dans celui de M. Biot décrit ci-dessus (524), mais la *compensation*,

c'est-à-dire l'emploi d'une seconde substance active, agissant en sens inverse de celle qu'on veut analyser, et dont l'épaisseur peut varier jusqu'à ce que les actions contraires des deux substances se détruisent complétement; en sorte qu'au lieu de mesurer la déviation du plan de polarisation, on mesure l'épaisseur à donner à la substance compensatrice, qui est une plaque de quartz, pour obtenir une compensation parfaite.

Cela posé, on peut distinguer dans l'appareil trois parties principales : un tube qui contient le liquide à analyser, un polariseur et un analyseur.

Le tube *m*, qui renferme le liquide, est en cuivre étamé intérieurement et fermé

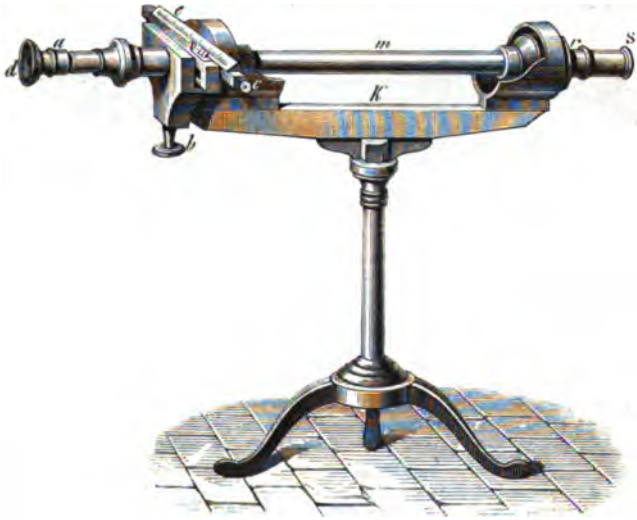


Fig. 353 (h = 47).

à ses deux extrémités par deux glaces à faces parallèles; il est soutenu sur un support *k*, qui se termine à ses deux bouts par deux tubes *r* et *a*, dans lesquels sont les cristaux qui servent de polariseurs et d'analyseurs, et qui sont représentés dans la coupe (fig. 354).

Devant l'orifice S (fig. 354) se place une lampe ordinaire à modérateur. La lumière émise par cette lampe, dans la direction de l'axe de l'instrument, rencontre d'abord un prisme biréfringent *r*, qui sert de polariseur (520, 3°). L'image ordinaire seule arrive à l'œil, l'image extraordinaire étant projetée hors du champ de la vision, à cause de l'amplitude de l'angle que font entre eux le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire. Enfin, le prisme biréfringent est dans une position telle que le plan de polarisation est vertical et passe par l'axe de l'appareil.

A sa sortie du prisme biréfringent, le faisceau polarisé rencontre une plaque de quartz *q* à double rotation, c'est-à-dire que cette plaque tourne à la fois le plan de polarisation à droite et à gauche. Pour cela, elle est formée de deux plaques de quartz de rotation contraire, juxtaposées l'une à côté de l'autre, comme le montre la figure 357, de façon que la ligne de séparation soit verticale et dans le même plan

que l'axe de l'appareil. Ces quartz, taillés perpendiculairement à l'axe, ont une épaisseur de 3 mill. 75, à laquelle correspond une rotation de 90°, et donnent une teinte rose violacée qui est la *teinte de passage*. Le quartz, qu'il soit dextrogyre ou lévogyre, tournant toujours d'une même quantité, à épaisseur égale (522, 3°), il en résulte que les deux quartz *a* et *b* font tourner également le plan de polarisation, l'un à droite, l'autre à gauche. Par conséquent, si on les regarde avec un prisme biréfringent, ils présentent exactemement la même teinte.

Après avoir traversé les quartz *q*, le faisceau polarisé passe dans le liquide que contient le tube *m*, et de là rencontre une nouvelle plaque de quartz *i*, simple et d'épaisseur arbitraire, dont on va voir bientôt l'usage.

Fig. 354.

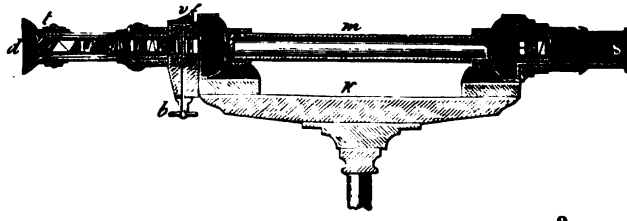


Fig. 355.

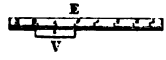


Fig. 356.

Fig. 357.

En *n* est le compensateur destiné à détruire la rotation de la colonne liquide *m*. Il est formé de deux quartz, ayant la même rotation, soit à droite, soit à gauche, mais contraire à celle de la plaque *i*. Ces deux quartz, représentés en coupe dans la figure 355, s'obtiennent en coupant obliquement un plaque de quartz à faces parallèles, de manière à former deux prismes de même angle N, N; en juxtaposant ensuite ces deux prismes, comme le représente la figure, il en résulte une seule plaque à faces parallèles, qui offre l'avantage de pouvoir varier d'épaisseur. Pour cela, chaque prisme est fixé à une coulisse, de façon à pouvoir glisser dans un sens ou dans l'autre, tout en conservant aux faces homologues leur parallélisme. Ce mouvement s'obtient au moyen d'une double crémaillère et d'un pignon qu'on tourne à l'aide d'un bouton *b* (fig. 353 et 354).

Quand les lames se déplacent respectivement dans le sens indiqué par les flèches (fig. 355), il est évident que la somme de leurs épaisseurs augmente, et qu'elle diminue quand les plaques avancent dans le sens opposé. Une échelle *e* et un vernier *v* (fig. 353) suivent les plaques dans leur mouvement et servent à mesurer les variations d'épaisseur du compensateur. Cette échelle, représentée ainsi que son vernier dans la figure 356, porte deux divisions ayant un zéro commun, l'une de gauche à droite pour les liquides dextrogyres, l'autre de droite à gauche pour les liquides lévogyres.

Lorsque le vernier est au zéro de l'échelle, la somme des épaisseurs des plaques N, N, est précisément égale à celle de la plaque *i*, et comme la rotation de cette dernière est contraire à celle du compensateur, l'effet est nul. Mais si l'on fait marcher, dans un sens ou dans l'autre, les plaques du compensateur, celui-ci ou le quartz *i* l'emporte, et il y a rotation à droite ou à gauche.

Après le compensateur est un prisme biréfringent *o* (fig. 354) servant d'analyseur pour observer le faisceau polarisé qui a traversé le liquide et les diverses plaques de quartz. Pour comprendre plus facilement l'objet du prisme *c*, nous négligerons, pour un instant, les cristaux et les lentilles représentés à sa droite dans le dessin. Si l'on fait d'abord coïncider le zéro du vernier *v* avec celui de l'échelle, et si le liquide contenu dans le tube est inactif, les actions du compensateur et de la plaque *i* se détruisent, et l'effet du liquide étant nul, les deux moitiés de la plaque *q*, vues au travers du prisme *o*, donnent rigoureusement la même teinte, ainsi qu'on l'a déjà observé ci-dessus. Mais si l'on remplace le tube plein de liquide inactif par un second tube rempli d'une dissolution sucrée, le pouvoir rotatoire de cette dissolution s'ajoute à celui de même sens de l'un des quartz de la plaque à double rotation *q*, et diminue d'autant le pouvoir rotatoire de l'autre quartz. Il résulte de là que les deux moitiés de la plaque *q* ne présentent plus la même teinte, et que la moitié *a* (fig. 357) est rouge, par exemple, tandis que la moitié *b* est bleue. On fait alors marcher les prismes du compensateur, en tournant le bouton *b* vers la droite ou vers la gauche, jusqu'à ce que la différence d'action du compensateur et de la plaque *i* compense le pouvoir rotatoire de la dissolution, ce qui a lieu au moment où les deux moitiés de la plaque Q à double rotation reviennent à leur teinte primitive.

Quant au sens de la déviation et à l'épaisseur du compensateur, on les mesure par le déplacement relatif de l'échelle *e* et du vernier *v*. Les divisions de l'échelle sont telles que 10 de ces divisions correspondent à une variation de 1 millimètre dans l'épaisseur du compensateur, et comme le vernier donne lui-même les dixièmes de ces divisions, il en résulte qu'il mesure des variations de $\frac{1}{100}$ de millimètre dans l'épaisseur du compensateur.

Une fois que la teinte des deux moitiés de la plaque Q est bien égale et la même qu'avant l'interposition de la dissolution sucrée, on lit sur l'échelle à quelle division correspond le vernier, et le nombre correspondant donne immédiatement le titre de la dissolution. Pour cela, on se fonde sur ce principe que 16gr,471 de sucre candi bien desséché et bien pur, étant dissous dans l'eau, et la liqueur étant amenée au volume de 100 centimètres cubes et observée dans un tube de 20 centimètres de longueur, la déviation produite est précisément celle que comporte une épaisseur de quartz de 1 millimètre. Cela posé, pour faire l'analyse d'un sucre brut, on adopte toujours un poids normal de 16gr,471 de ce sucre, qu'on fait dissoudre dans de l'eau, et le volume de la dissolution étant amené à 100 centimètres cubes, on en remplit le tube de 20 centimètres de longueur, et on observe le nombre indiqué par le vernier, quand on a retrouvé la teinte primitive. Ce nombre étant, par exemple 42, on en conclut que cette dissolution contient, de sucre cristallisable, 42 pour 100 de ce que contenait la dissolution de sucre candi, et, par conséquent, $16^{gr},471 \times \frac{42}{100}$, ou 6gr,918. Toutefois, ce résultat n'est exact qu'autant qu'on est assuré que le sucre soumis à l'expérience n'est pas mélangé de sucre incristallisable ou d'une autre substance lévogyre. Alors on a recours à l'*inversion*, c'est-à-dire qu'on transforme, au moyen de l'acide chlorhydrique, le sucre cristallisable, qui est dextrogyre, en sucre incristallisable, qui est lévogyre, puis on fait une nouvelle opération qui, combinée avec la première, donne la quantité de sucre cristallisable. Ne pouvant donner ici de plus grands développements sur ce sujet, nous renvoyons le lecteur à une excellente brochure publiée par M. Clerget, en 1850, sur l'emploi du saccharimètre.

Il nous reste à faire connaître l'usage des cristaux et des lentilles *o*, *g*, *f*, *a*, placés à la suite du prisme *c* (fig. 354). Leur ensemble forme ce que M. Soleil a nommé le *producteur des teintes sensibles*. En effet, la teinte la plus sensible, c'est-à-dire celle

qui permet de distinguer une différence très-faible dans la coloration des deux moitiés de la plaque de rotation, n'est pas la même pour tous les yeux; pour le plus grand nombre, c'est une nuance bleu violacé qui rappelle celle de la fleur de lin Il importe donc de produire facilement cette teinte ou toute autre plus sensible à l'œil de l'observateur. Pour cela, en avant du prisme *c* est d'abord une plaque de quartz *o* taillée perpendiculairement à l'axe, puis une petite lunette de Galilée (470), formée d'un verre biconvexe *g* et d'un verre biconcave *f*, pouvant se rapprocher entre eux ou s'écarter suivant la distance de la vue distincte de chaque observateur. Enfin, l'appareil se termine par un prisme de Nicol *a* fixé dans un tube *t* qu'on tourne à volonté sur lui-même. Or, le prisme biréfringent *c* agissant comme polariseur par rapport au quartz *o*, et le prisme *a* comme analyseur, il en résulte que lorsqu'on tourne ce dernier, à droite ou à gauche, la lumière qui a traversé le prisme *c* et la plaque *o* change de teinte (523), et finit par donner celle que l'expérimentateur a adoptée pour teinte fixe.

526. Analyse de l'urine des diabétiques. — Dans la maladie connue sous le nom de *diabète sucrée*, les urines sont chargées d'une forte quantité d'un sucre fermentescible qu'on nomme sucre de diabète. Ce sucre, à l'état naturel dans les urines, dévie le plan de polarisation vers la droite. Pour doser la quantité de sucre contenu dans les urines des diabétiques, on commence, si elles ne sont pas assez limpides, par les clarifier par le sous-acétate de plomb; on filtre, on remplit le tube *m* de l'urine ainsi clarifiée, puis on tourne le bouton *b* jusqu'à ce qu'on obtienne, pour la plaque à deux rotations, la même teinte qu'avant l'interposition de l'urine. L'expérience ayant appris que 100 parties de l'échelle du saccharimètre représentent le déplacement à donner aux quartz compensateurs lorsqu'il entre dans l'urine 225gr,6 de sucre par litre, il en résulte que chaque division de l'échelle représente 2gr,256 de sucre. Par conséquent, pour obtenir la quantité de sucre contenue dans une urine donnée, il faut multiplier 2gr,256 par le nombre qu'indique le vernier au moment où l'on retrouve la teinte primitive.

COULEURS PRODUITES PAR L'INTERFÉRENCE DES RAYONS POLARISÉS.

527 Lois de l'interférence des rayons polarisés. — Après la découverte de la polarisation, Arago et Fresnel cherchèrent si les rayons polarisés présentaient entre eux les mêmes phénomènes d'interférence que les rayons non polarisés, et ce fut ainsi qu'ils arrivèrent à découvrir les lois suivantes sur l'interférence de la lumière polarisée, et en même temps les brillants phénomènes de coloration décrits ci-après (528 à 533).

1re *loi*. — Deux rayons polarisés dans le même plan interfèrent entre eux absolument comme deux rayons naturels.

2e *loi*. — Deux rayons polarisés dans deux plans perpendiculaires n'interfèrent pas dans le cas où interféreraient deux rayons naturels.

3e *loi*. — Deux rayons, polarisés d'abord dans des plans perpendiculaires, peuvent être amenés dans le même plan de polarisation, sans acquérir pour cela la propriété d'interférer entre eux.

4e *loi*. — Deux rayons polarisés dans des plans perpendiculaires, et ramenés ensuite au même état de polarisation, interfèrent comme de la lumière ordinaire, s'ils ont été primitivement polarisés dans un même plan.

5e *loi*. — Dans les phénomènes d'interférence par des rayons qui ont subi la double réfraction, le lieu des franges colorées n'est pas déterminé uniquement par la différence des routes ou des vitesses, car dans certaines circonstances il faut tenir compte d'une demi-ondulation en plus ou en moins.

Ces lois sont d'une grande importance; car ce sont elles qui donnent l'explication des diverses circonstances dans lesquelles les rayons polarisés donnent ou ne donnent pas lieu aux phénomènes de coloration qui vont être décrits.

528. Teintes produites par la lumière polarisée en traversant les lames minces biréfringentes. — En étudiant les propriétés de la lumière polarisée (516) on a vu qu'un faisceau de lumière polarisé par sa réflexion sur un premier miroir, ne se réfléchit plus sur un second, si les deux plans de réflexion sont perpendiculaires entre eux; ou encore que la lumière polarisée ne peut traverser une plaque de tourmaline dont l'axe est parallèle au plan de polarisation; enfin, que la lumière polarisée par son passage au travers d'un prisme biréfringent ne donne qu'une seule image quand le plan de la section principale de ce prisme est perpendiculaire ou parallèle au plan de polarisation. Or, dans ces diverses expériences, il suffit que la lumière, après être polarisée, traverse une lame mince de mica, de sulfate de chaux, de cristal de roche, de chaux carbonatée, ou de toute autre substance biréfringente, pour que les phénomènes soient entièrement changés.

Pour observer les effets qui se produisent alors, l'appareil le plus commode est celui de Noremberg (fig. 349 et 350). En *g* (fig. 350) est un prisme biréfringent, ou une tourmaline, ou un prisme de Nicol. La plaque mince cristallisée est placée sur l'écran *e*, ou en *p*, sur la glace étamée; mais il est à remarquer que, dans ce dernier cas, la lumière polarisée sur la glace non étamée *n* traverse deux fois la lame cristallisée placée en *p*, et que par suite on obtient le même effet que si la plaque n'étant traversée qu'une fois par la lumière polarisée, elle avait une épaisseur double.

Or, l'analyseur placé en *g* étant un prisme biréfringent, on a vu (520) que tant qu'aucune lame cristallisée n'est encore placée sur l'appareil, le faisceau polarisé sur la glace *n* et renvoyée vers le prisme, le traverse en subissant une double réfraction, d'où il résulte que l'œil placé au-dessus voit deux images de l'ouverture *e* percée au centre du diaphragme *a*. Ces deux images sont blanches et d'intensités inégales, et en faisant tourner le prisme sur son support, chacune d'elles s'affaiblit successivement, et s'éteint toutes les fois que la section principale du prisme devient perpendiculaire ou parallèle au plan de polarisation du faisceau.

Cela posé, lorsqu'on interpose au-dessous du prisme une lame biréfringente, taillée parallèlement à l'axe, voici les phénomènes qu'on observe :

1o La section principale de la lame étant parallèle ou perpendiculaire au plan de polarisation du faisceau, l'œil aperçoit toujours deux images blanches qui subissent, lorsqu'on fait tourner le prisme biréfringent, les mêmes variations d'intensité que si la lame n'existait pas.

2o Lorsque la section principale de la lame n'est ni parallèle, ni perpendiculaire au plan de polarisation, les deux images sont colorées, et leurs couleurs sont complémentaires, car lorsqu'elles se superposent par leurs bords, la partie commune est blanche.

3o La lame restant fixe, si l'on fait tourner le prisme, les teintes des images ne changent pas, mais leur intensité varie et le maximum d'éclat a lieu quand la section principale du prisme fait avec celle de la lame un angle de 45 ou de 135 degrés, c'est-à-dire dans la position intermédiaire à celles qui correspondent aux cas où les deux images sont blanches; de plus, les images échangent successivement entre elles leurs couleurs, en passant par le blanc, ce qui a lieu lorsque les sections principales du prisme et de la lame sont parallèles ou perpendiculaires entre elles.

En employant, pour analyseur, une tourmaline ou un prisme de Nicol au lieu d'un prisme biréfringent, on observe encore les mêmes phénomènes de coloration, seulement on n'a qu'une image.

529. **Influence de l'épaisseur des lames.** — Pour des lames de même substance, les teintes changent avec l'épaisseur et diminuent d'intensité à mesure que les lames sont plus épaisses. Il est même une limite d'épaisseur au delà de laquelle on n'obtient plus de coloration. Pour le mica, cette limite est de 88 centièmes de millimètre ; pour la chaux sulfatée et le cristal de roche, de 45 centièmes ; et pour le spath d'Islande, de 25 millièmes. C'est ce qui rend la coloration très-difficile à obtenir avec cette substance, à cause de la difficulté de la tailler en lames assez minces. Au contraire, pour le mica et la chaux sulfatée, qui se clivent facilement en lames extrêmement minces, l'expérience réussit très-bien.

On obtient d'une même lame des teintes différentes, en l'inclinant plus ou moins par rapport au faisceau polarisé qui la traverse. Cela revient, en effet, à faire varier son épaisseur.

Pour une même substance, avec des lames d'épaisseur croissante, les teintes varient suivant les mêmes lois que les teintes des anneaux colorés de Newton correspondant à des couches d'air de plus en plus épaisses (514) ; seulement l'épaisseur de la lame cristallisée doit l'emporter de beaucoup sur celle de la couche d'air. En effet, pour une teinte de même ordre, l'épaisseur du mica doit être 440 fois celle de la couche d'air ; pour le cristal de roche et la chaux sulfatée, 230 fois ; et pour le spath d'Islande, 13 fois seulement.

530. **Théorie de la coloration produite par la lumière polarisée.** — En se fondant toujours sur la théorie des ondulations, Fresnel a donné une explication simple et complète des teintes produites par la lumière polarisée lorsqu'elle traverse des lames biréfringentes, en faisant voir que ces teintes ont pour cause l'inégale vitesse des rayons ordinaire et extraordinaire après qu'ils ont traversé la lame biréfringente, inégalité d'où résultent, entre les deux systèmes d'ondulations, des retards ou des avances qui les placent dans des conditions convenables pour interférer et par suite pour développer des couleurs (512).

Pour se rendre compte de la formation des couleurs par l'interférence des rayons polarisés qui ont traversé une lame biréfringente, considérons ce qui se passe dans l'expérience de l'appareil de Noremberg, décrite plus haut (528), et supposons que la lame cristallisée étant à un seul axe, cet axe fasse un angle de 45 degrés avec le plan de polarisation du faisceau incident. A son passage au travers de la lame biréfringente, ce faisceau se partage en deux faisceaux, ordinaire et extraordinaire, d'égale intensité, et polarisés chacun dans un plan faisant avec le plan de polarisation primitif des angles de $+45°$ et $-45°$; d'où il résulte que ces deux faisceaux sont polarisés dans deux plans rectangulaires entre eux, et que par suite il ne peut y avoir interférence d'après la deuxième loi d'Arago et Fresnel (527). Cela posé, soient O et E les deux faisceaux ordinaire et extraordinaire qui, sortant de la lame mince, viennent tomber sur le prisme biréfringent, dont nous supposerons la section principale dans le plan de polarisation primitif ; chacun des faisceaux O et E, en traversant le prisme, se divise respectivement en deux autres que nous désignerons par O_o et O_e pour le premier, et par E_o et E_e pour le second, ces quatre faisceaux ayant du reste la même intensité. Or, les faisceaux E_e et O_e sont parallèles, comme ayant le même indice de réfraction, et ne diffèrent entre eux que par un certain intervalle d ; les faisceaux E_o et O_o sont aussi parallèles, mais diffèrent par un intervalle $d \pm \frac{1}{2}$ ondulations, d'après le principe qu'en passant du rayon ordinaire au rayon extraordi-

naire, il faut tenir compte d'une demi-ondulation en plus ou en moins (527, 5e loi). Or, comme les rayons de chaque couple sont ramenés dans un même plan de polarisation, savoir, les rayons ordinaires O_0 et E_0 dans le plan de la section principale du prisme, et les rayons O_0 et E_0 dans un plan perpendiculaire au premier; il n'y a plus obstacle à l'interférence des rayons d'un même couple, et l'on voit apparaître des couleurs complémentaires dans les faisceaux qui correspondent aux intervalles d et $d +$ un nombre impair de demi-ondulations.

Si l'on conçoit maintenant que la lame cristallisée soit traversée par un second faisceau, polarisé dans un plan perpendiculaire au plan de polarisation ci-dessus, ce nouveau faisceau subira les mêmes divisions et subdivisions que le précédent, mais les intervalles de retard seront différents. En effet, le plan de polarisation du nouveau faisceau se rapportant maintenant à celui de la réfraction ordinaire, tandis que celui du premier faisceau se rapportait au plan de réfraction extraordinaire, il en résulte une différence d'une demi-ondulation dans la position relative des deux systèmes d'ondes O et E à leur émergence; c'est-à-dire que l'intervalle qui était d dans le cas précédent, sera maintenant d moins un nombre impair de demi-oscillations; et après la transmission au travers du prisme, les intervalles de retard des deux faisceaux seront respectivement $d - \frac{n}{2}$ et d, au lieu de d et $d + \frac{n}{2}$ qu'ils étaient d'abord, n étant un nombre impair. Ceci explique comment les deux faisceaux font un échange de couleurs lorsqu'on fait tourner le plan de polarisation de 90 degrés.

Il reste à chercher pourquoi il ne se produit pas de couleurs dans l'expérience ci-dessus, lorsque la lame cristallisée, au lieu d'être traversée par de la lumière polarisée, l'est par de la lumière naturelle. Or on a vu (518) que la lumière naturelle peut toujours être regardée comme formée de deux faisceaux égaux polarisés à angle droit; d'où il résulte, d'après ce qui a été dit ci-dessus, que lorsque la lame cristallisée est traversée par de la lumière naturelle, chaque faisceau émergent O et E donne lieu à deux couleurs complémentaires qui se superposent et qui, étant de même intensité, produisent de la lumière blanche.

531. Anneaux colorés produits par la lumière polarisée en traversant les lames biréfringentes. — Dans l'expérience faite avec l'appareil de Noremberg et décrite précédemment (528), la lame cristallisée étant traversée perpendiculairement à ses faces par un faisceau de lumière parallèle, toutes les parties

Fig. 358.

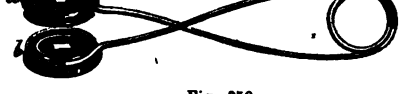


Fig. 359.

de la lame agissent de la même manière, et on a partout la même teinte. Or les effets ne sont plus les mêmes lorsque les rayons incidents traversent la lame sous des obliquités différentes, car cela revient à des épaisseurs inégales, d'où résultent des anneaux tout à fait semblables aux anneaux de Newton (514).

Le meilleur appareil pour observer ces nouveaux phénomènes est *la pince à tourmaline*. On nomme ainsi un petit instrument qui se compose de deux tourmalines taillées parallèlement à l'axe, et enchâssées chacune dans un disque de cuivre. Ces deux disques qui sont percés à leur centre et noircis, sont eux-mêmes montés dans deux anneaux de fil de cuivre argenté, lequel s'enroule sur lui-même, comme le montre la figure 359, de manière à former ressort et à faire appliquer l'une contre l'autre les

deux tourmalines. Celles-ci tournant avec les disques, on les dispose à volonté, de manière que leurs axes soient parallèles ou perpendiculaires entre eux.

Cela posé, le cristal sur lequel on veut expérimenter étant fixé au centre d'un disque de liége (fig. 538), on place celui-ci entre les deux tourmalines, puis on applique la pince en avant de l'œil de manière à recevoir la lumière diffuse du ciel. La tourma-

Fig. 360.

Fig. 361.

Fig. 362.

line opposée à l'œil agit alors comme polariseur, et l'autre comme analyseur (520). Si le cristal qu'on observe ainsi étant à un seul axe et taillé perpendiculairement à l'axe est éclairé par une lumière simple, de la lumière rouge, par exemple, on voit se produire une série d'anneaux circulaires alternativement rouges et obscurs. Avec une autre couleur simple, on obtient des anneaux semblables, mais leur diamètre augmente avec la réfrangibilité de la couleur. Au contraire, le diamètre des anneaux diminue quand l'épaisseur des lames augmente, et au delà d'une certaine épaisseur, il ne s'en produit plus. Si au lieu d'éclairer les lames avec de la lumière homogène, on les éclaire avec de la lumière blanche, comme les anneaux de différentes teintes qui se produisent alors n'ont pas le même diamètre, ils se superposent en partie, en produisant des anneaux irisés très-brillants.

La position du cristal est sans influence sur les anneaux, mais il n'en est pas de même

Fig. 363.

Fig. 364.

Fig. 365.

de la position relative des deux tourmalines. Par exemple, en expérimentant sur un spath d'Islande, taillé perpendiculairement à l'axe, et de 1 à 30 millimètres d'épaisseur, lorsque les axes des tourmalines sont perpendiculaires entre eux, on observe une belle série d'anneaux vivement colorés et traversés par une croix noire comme le montre la figure 360; si les axes des tourmalines sont parallèles, les anneaux se colorent

de teintes complémentaires de celles qu'ils avaient d'abord, et ils sont alors traversés par une croix blanche (fig. 561).

Pour se rendre compte de la formation des anneaux par la lumière polarisée en traversant les lames biréfringentes, il faut observer que, dans le cas que nous considérons, ces lames sont traversées par un faisceau conique convergent dont le sommet est l'œil de l'observateur. D'où il suit que l'épaisseur de la lame que doivent traverser les rayons augmente avec leur divergence, mais que pour des rayons de même obliquité, cette épaisseur est la même, d'où résultent des différences de vitesse du rayon ordinaire et du rayon extraordinaire qui expliquent la formation des couleurs et leur disposition circulaire autour de l'axe du faisceau et du cristal. Quant à la croix noire,

Fig. 366.

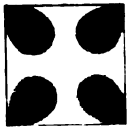


Fig. 367.

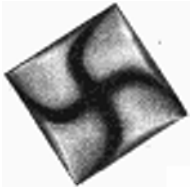


Fig. 369.

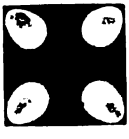


Fig. 368.

Fig. 371.

Fig. 370.

elle est due à ce que la lumière polarisée est absorbée dans le plan de la section principale de la tourmaline et dans le plan perpendiculaire.

On observe des effets analogues avec tous les cristaux à un axe, comme la tourmaline, l'émerande, le corindon, le béryl, le mica, le phosphate de plomb, le prussiate de potasse, le cristal de roche. Toutefois, avec ce dernier, la croix disparaît par un effet de polarisation rotatoire (523).

532. **Anneaux dans les cristaux à deux axes.** — Dans les cristaux à deux axes il se produit encore des anneaux colorés, mais d'une forme plus compliquée. Les bandes colorées, au lieu d'être circulaires et concentriques, présentent alors la forme de courbes à deux centres, le centre de chaque système correspondant à l'un des axes du cristal. Les figures 363, 364 et 367 représentent les courbes que donne avec la pince à tourmaline l'azotate de potasse taillé perpendiculairement à l'axe. Quand les axes des deux tourmalines sont rectangulaires, on a la figure 363; puis en tournant lentement le cristal, sans changer les tourmalines, on passe par la figure 364, pour arriver à la figure 365, lorsqu'on a tourné de 45 degrés. Si les axes des tourma-

lines sont parallèles, on obtient les mêmes courbes colorées, mais leurs teintes sont supplémentaires et la croix noire se change en croix blanche. Si l'angle des deux axes de cristal dépasse 20 à 25 degrés, on ne peut voir à la fois les deux systèmes de courbes : c'est ce qui arrive, par exemple, pour l'aragonite qui donne la figure 362.

Herschel, qui a mesuré avec soin les anneaux donnés par les cristaux à deux axes, les rapporte au genre de courbe connu en géométrie sous le nom de *lemniscate*.

533. **Coloration produite par le verre trempé ou comprimé.** — Le verre ordinaire n'est pas doué de la double réfraction, mais il acquiert cette propriété si, par une cause quelconque, son élasticité est modifiée dans une direction plus que dans l'autre. Pour cela, il suffit de le comprimer fortement dans un sens, de le courber, ou de le tremper, c'est-à-dire de le refroidir rapidement après l'avoir chauffé. Si le verre est alors traversé par un faisceau de lumière polarisée, on obtient des effets de coloration tout à fait analogues à ceux observés ci-dessus dans les cristaux biréfringents, mais beaucoup plus variés, selon la forme circulaire, carrée, rectangulaire, triangulaire, qu'on donne aux plaques de verre, et suivant le degré de tension de leurs particules.

Le polariseur étant une glace de verre noir sur laquelle on reçoit la lumière des nues, et l'analyseur un prisme de Nicol au travers duquel on regarde les plaques de verre traversées par la lumière polarisée, les figures 366, 367 et 368 représentent les dessins qu'on observe en faisant tourner successivement, dans son propre plan, une plaque carrée de verre trempé. Les figures 369 et 370 représentent les dessins que donne, dans le même cas, une plaque circulaire, et la figure 371 le dessin fourni par deux plaques rectangulaires superposées ; dessin qui varie lui aussi lorsqu'on fait tourner le système de plaques.

Les verres comprimés, ou courbés, présentent des effets de même genre, et qui varient dans les mêmes conditions.

534. **Polarisation du calorique.** — De même que la lumière, le calorique peut se polariser par réflexion et par réfraction (516) ; mais les recherches à ce sujet présentent de grandes difficultés. Les premières furent faites en 1810 par Bérard et Malus lui-même ; le dernier étant mort, Bérard les continua seul.

Dans les expériences de ce savant, les rayons calorifiques réfléchis sur une première glace étaient reçus sur une deuxième, comme dans l'appareil de Noremberg (fig. 349), et de là tombaient sur un petit réflecteur métallique qui les concentrait sur la boule d'un thermomètre différentiel. Bérard observa ainsi un minimum d'intensité quand le plan de réflexion, sur la seconde glace, était perpendiculaire au plan de réflexion sur la première. Ce phénomène étant le même que celui que présente la lumière dans la même expérience (521), Bérard en conclut que le calorique se polarisait en se réfléchissant sur la première glace.

Melloni a appliqué son thermo-multiplicateur à l'étude de la polarisation du calorique, et en faisant passer les rayons calorifiques au travers de deux tourmalines parallèles ou au travers de deux piles de mica, il a constaté qu'ils se polarisaient par réfraction. Il a trouvé de plus que l'angle de polarisation (517) est sensiblement le même pour le calorique que pour la lumière.

LIVRE VIII

DU MAGNÉTISME.

CHAPITRE PREMIER

PROPRIÉTÉS DES AIMANTS.

535. **Aimants naturels et aimants artificiels.** — On nomme *aimants* des corps qui ont la propriété d'attirer le fer et quelques autres métaux, qui sont le nickel, le cobalt et le chrome. Toutefois, nous citerons bientôt des expériences qui prouvent que les aimants agissent réellement sur tous les corps, tantôt par attraction, tantôt par répulsion, mais d'une manière très-faible (543).

On distingue des aimants naturels et des aimants-artificiels. L'*aimant naturel*, ou *pierre d'aimant*, est un oxyde de fer, connu, en chimie, sous le nom d'*oxyde magnétique*. Sa formule est $Fe^3O^4 = FeO + Fe^2O^3$, c'est-à-dire qu'il est formé d'un équivalent de protoxyde et d'un équivalent de sesqui-oxyde. L'oxyde magnétique est très-abondant dans la nature; on le rencontre dans les terrains anciens et surtout en Suède et en Norvége, où on l'exploite comme minerai de fer, et où il donne la meilleure qualité de fer connue. Toutefois, la plupart des échantillons d'oxyde de fer magnétique n'attirent pas le fer; ce n'est qu'accidentellement qu'ils sont doués de cette propriété.

Les *aimants artificiels* sont des barreaux ou des aiguilles d'acier trempés (76), qui ne possèdent pas naturellement les propriétés des aimants naturels, mais qui les ont acquises par des frictions avec un aimant, ou par des procédés électriques qui seront décrits plus tard. On forme aussi des aimants artificiels avec du fer *doux*, c'est-à-dire sensiblement exempt de toute matière étrangère; mais leur aimantation n'est pas durable comme celle des barreaux d'acier.

Les aimants artificiels sont plus puissants que les aimants naturels, et jouissent de propriétés complétement identiques.

Le pouvoir attractif des aimants s'exerce à toutes les distances et à travers tous les corps; il décroît très-vite quand la distance augmente, et varie avec la température. Coulomb a fait voir que l'intensité magnétique d'un barreau diminue à mesure qu'on élève

sa température, et reprend sa valeur première quand il revient à la température primitive, pourvu qu'on n'ait pas dépassé une certaine limite; car, à la température rouge, les aimants perdent complétement leur puissance attractive.

L'attraction que l'aimant exerce sur le fer est réciproque, ce qui est, du reste, un principe général de toutes les attractions. On le vérifie en présentant une masse de fer à un aimant : celui-ci est attiré.

La force attractive des aimants a reçu le nom de *force magnétique*, et leur théorie physique se désigne elle-même sous le nom de *magnétisme*[1], expression qu'on ne doit pas confondre avec celle de *magnétisme animal*, qu'on a adoptée pour exprimer l'influence qu'une personne exercerait sur une autre par l'empire de sa volonté, influence qui est loin d'être démontrée.

536. **Pôles et ligne neutre.** — Les aimants ne possèdent pas,

Fig. 372.

dans tous leurs points, la même force magnétique. En effet, si l'on roule un barreau aimanté dans de la limaille de fer, on voit celle-ci adhérer abondamment vers les extrémités du barreau sous la forme de houppes hérissées (fig. 372); mais l'adhérence de la limaille décroît rapidement à mesure qu'on s'éloigne des extrémités, jusqu'à la région moyenne du barreau, où elle est nulle. La partie de la surface de l'aimant où la force magnétique est insensible a reçu le nom de *ligne neutre*, et les deux points voisins des extrémités, où se manifeste le maximum d'attraction, se nomment *pôles*. Tout aimant, naturel ou artificiel, présente deux pôles et une ligne neutre; toutefois, dans l'aimantation des barreaux et des aiguilles, il se produit parfois des alternatives de pôles contraires situés entre les pôles extrêmes. Ces pôles intermédiaires se nomment *points conséquents*. Tantôt ils sont en nombre pair, tantôt en nombre

1. Le mot *magnétisme* vient du nom grec μάγνης, sous lequel les anciens désignaient la pierre d'aimant, parce que c'est, dit-on, près de la ville de Magnésie, en Lydie, qu'ils trouvèrent d'abord ce minerai.

impair. Nous supposerons toujours que les aimants n'ont que deux pôles, ce qui est le cas ordinaire.

Les pôles se désignent, l'un sous le nom de *pôle austral*, l'autre sous celui de *pôle boréal*, expressions empruntées à l'action que les pôles terrestres exercent sur les pôles des aimants (544). Dans nos dessins, le pôle austral sera toujours représenté par les lettres *a* ou A, le pôle boréal par les lettres *b* ou B, et on appellera pôles de *même nom* ceux qui sont représentés par les mêmes lettres.

537. **Actions mutuelles des pôles.** — Les deux pôles d'un aimant paraissent identiques quand on les présente à de la limaille de fer; mais cette identité n'est qu'apparente. En effet, qu'on suspende une petite aiguille aimantée *ab* (fig. 373) à un fil fin, et qu'on approche du pôle austral *a* le pôle austral A d'une autre aiguille, on remarque une vive répulsion; qu'on approche, au contraire, le pôle A du pôle boréal de l'aiguille mobile, il se produit une forte attraction. Donc les pôles *a* et *b* ne sont pas identiques, puisque l'un est repoussé et l'autre attiré par le même pôle A de l'aimant qu'on tient à la main. On vérifie de même que les deux pôles de ce dernier diffèrent entre eux, en les présentant successivement au même pôle *a* de l'aiguille mobile. Avec l'un, il y a répulsion, et attraction avec l'autre. On peut donc poser cette loi simple sur les actions réciproques qui s'exercent entre deux aimants :

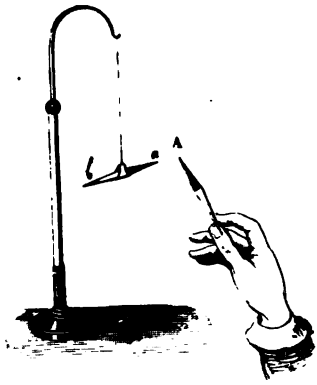


Fig. 373.

Les pôles de même nom se repoussent, et les pôles de nom contraire s'attirent.

Les actions contraires du pôle boréal et du pôle austral se démontrent encore par l'expérience suivante : on fait porter à un barreau aimanté un objet de fer, une clef, par exemple; puis, sur ce premier barreau, on en fait glisser un second sensiblement de même force, en ayant soin de mettre en regard les pôles contraires (fig. 374). La clef continue à être portée, tant que les deux pôles sont éloignés; mais aussitôt qu'ils sont suffisamment rappro-

ches, elle tombe comme si le barreau qui la soutenait avait perdu tout à coup sa propriété magnétique; cependant il n'en est rien, car celui-ci peut la porter de nouveau aussitôt qu'on a retiré le second barreau.

538. **Hypothèse des deux fluides magnétiques.** — Pour expliquer les phénomènes qu'on vient de faire connaître, les physiciens ont été conduits à admettre l'hypothèse de deux *fluides magnétiques*, agissant chacun par répulsion sur lui-même et par attraction sur l'autre fluide. Ces deux fluides ont reçu les noms, l'un de *fluide austral*, et l'autre de *fluide boréal*, du nom des pôles des aimants où leurs actions sont prépondérantes.

On admet qu'avant l'aimantation, ces fluides sont combinés autour de chaque molécule et se neutralisent réciproquement, mais qu'ils peuvent être séparés sous l'influence d'une force plus grande que leur attraction mutuelle, et se déplacer autour des molécules sans sortir de la sphère d'activité qui leur est assignée

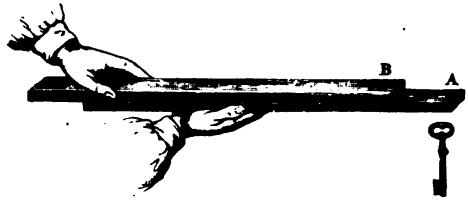


Fig. 374.

autour de chacune d'elles. Les fluides sont alors *orientés*, c'est-à-dire que dans la sphère magnétique qui enveloppe chaque molécule, le fluide boréal est tourné constamment dans une même direction, et le fluide austral dans une direction opposée, d'où proviennent deux résultantes de direction contraire, dont les deux pôles de l'aimant sont les points d'application. Mais aussitôt que l'orientation des fluides cesse, l'équilibre s'établit de nouveau autour de chaque molécule et la résultante finale est nulle, c'est-à-dire qu'il n'y a plus attraction ni répulsion.

L'hypothèse des deux fluides magnétiques se prête d'une manière fort simple à l'explication des phénomènes : aussi est-elle généralement adoptée comme méthode de démonstration. Toutefois, on verra plus tard que les phénomènes magnétiques paraissent résulter non des actions opposées de deux fluides spéciaux, mais de courants particuliers de la matière électrique dans les corps aimantés ;

hypothèse qui offre l'avantage de rattacher la théorie du magnétisme à celle de l'électricité.

539. **Différence entre les substances magnétiques et les aimants.** — On nomme *substances magnétiques* les substances qui sont attirées par l'aimant, comme le fer, l'acier, le nickel. Ces substances contiennent les deux fluides, mais à l'état de neutralisation. Les composés ferrugineux sont généralement magnétiques, et le sont d'autant plus qu'ils contiennent plus de fer. Quelques-uns cependant, comme le persulfure de fer, ne sont pas attirés par l'aimant.

Il est facile de distinguer une substance magnétique d'un aimant. La première n'a pas de pôles; présentée successivement aux deux extrémités d'une aiguille mobile *ab* (fig. 473), elle les attire toutes les deux, tandis qu'un aimant attirerait l'une et repousserait l'autre, si l'on avait soin de le présenter par le même pôle.

540. **Aimantation par influence.** — Lorsqu'une substance magnétique est mise en contact avec un barreau aimanté, les deux

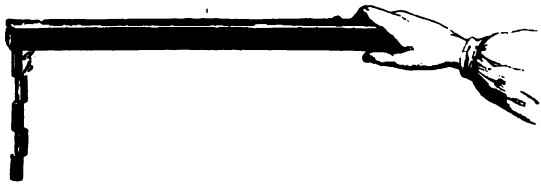


Fig. 375.

fluides de cette substance sont séparés, et elle devient, tant que le contact persiste, un aimant complet, ayant ses deux pôles et sa ligne neutre. Par exemple, si l'on fait porter par l'un des pôles d'un aimant (fig. 375) un petit cylindre *ab* de fer doux, ce cylindre peut, à son tour, porter un second cylindre semblable, puis celui-ci un troisième, et ainsi de suite, jusqu'à 7 ou 8, suivant la force du barreau. Chacun de ces petits cylindres est donc un aimant, mais seulement tant que continue l'influence du barreau aimanté. Car si l'on interrompt le contact de celui-ci avec le premier cylindre, immédiatement, ou du moins après un intervalle fort court, les autres cylindres se détachent et ne conservent aucune trace de magnétisme. La séparation des deux fluides n'a donc été que momentanée, ce qui montre que l'aimant n'a rien cédé au fer. Le nickel s'aimante aussi très-bien sous l'influence d'un fort aimant.

L'aimantation par influence explique la formation des houppes de limaille qui s'attachent aux pôles des aimants (fig. 372). Les parcelles en contact avec l'aimant agissent par influence sur les parcelles voisines, celles-ci sur les suivantes, et ainsi de suite, ce qui donne naissance à la disposition filamenteuse de la limaille.

541. **Force coercitive.** — On nomme *force coercitive* la force plus ou moins intense qui, dans une substance magnétique, s'oppose à la séparation des deux fluides, ou à leur recomposition quand ils ont été séparés. D'apres l'expérience ci-dessus, cette force est inappréciable dans le fer doux, puisque ce métal s'aimante instantanément par l'influence d'un aimant. Dans l'acier trempé, au contraire, cette force est grande, et l'est d'autant plus que la trempe est plus forte. En effet, mis en contact avec un aimant, un barreau d'acier ne s'aimante que lentement; il est même nécessaire de le frictionner avec l'un des pôles de l'aimant, si l'on veut lui faire acquérir toute sa force. La séparation des deux fluides offre donc ici une résistance qui ne se rencontre pas dans le fer doux. Il en est de même de leur recomposition, car un barreau d'acier, une fois aimanté, ne perd que difficilement ses propriétés magnétiques. On verra bientôt que par l'oxydation, la pression ou la torsion, le fer doux peut aussi acquérir une certaine force coercitive, mais peu durable.

542. **Expérience des aimants brisés.** — La présence des deux fluides dans toutes les parties d'un aimant se démontre par l'expérience suivante : on prend une aiguille à tricoter, en acier, on l'aimante en opérant des frictions avec l'un des pôles d'un aimant; puis, ayant constaté l'existence des deux pôles et de la ligne neutre avec de la limaille de fer, on casse l'aiguille en son milieu, c'est-à-dire dans la direction de sa ligne neutre. Or, en présentant successivement les deux moitiés aux pôles d'une aiguille mobile (fig. 373), on remarque qu'au lieu de ne contenir qu'un fluide, elles ont chacune deux pôles contraires et une ligne neutre. Si l'on brise de même ces nouveaux aimants en deux parties, on trouve encore que chacune d'elles est un aimant complet ayant ses deux pôles et sa ligne neutre, et ainsi de suite aussi loin qu'on peut continuer la division : on en conclut, par analogie, que les plus petites parties d'un aimant contiennent les deux fluides.

543. **Action des aimants sur tous les corps; corps diamagnétiques.** — Coulomb, le premier, observa, en 1802, que les aimants agissent sur tous les corps à des degrés plus ou moins marqués; phénomène qu'il constata en faisant osciller de petits barreaux de

différentes substances entre les pôles opposés de deux forts barreaux aimantés, puis loin de influence de tout aimant, et en comparant le nombre d'oscillations exécutées, dans les deux cas, en des temps égaux. On attribua d'abord ces phénomènes à la présence de matières ferrugineuses dans les corps soumis à l'expérience; mais M. Lebaillif, et, plus tard, MM. Becquerel, ont démontré que les aimants exercent réellement une action sur tous les corps. On a constaté de plus que cette action est tantôt attractive et tantôt répulsive : les corps attirés ont reçu le nom de *corps magnétiques*, et ceux qui sont repoussés ont été nommés *corps diamagnétiques*. Parmi ces derniers sont le bismuth, le plomb, le soufre, la cire, l'eau, etc. Le cuivre est tantôt magnétique, tantôt diamagnétique, ce qui tient probablement à son degré de pureté.

M. Faraday, en 1847, avait reconnu que les aimants puissants exercent sur les flammes une action répulsive qu'il attribua à une différence de diamagnétisme entre les gaz. Depuis, M. Ed. Becquerel, qui a fait d'importants travaux sur cette matière, a reconnu que, de tous les gaz, c'est l'oxygène qui a la plus grande puissance magnétique, et qu'un mètre cube de ce gaz condensé agirait sur une aiguille aimantée comme 5gr,5 de fer.

Quelques physiciens ont regardé le diamagnétisme comme une propriété distincte du magnétisme. M. Ed. Becquerel lie entre eux les phénomènes de magnétisme et de diamagnétisme par une hypothèse ingénieuse : il admet qu'il n'y a pas deux genres d'actions entre les corps et les aimants, mais seulement une aimantation par influence, et que la répulsion exercée sur certaines substances est due à ce que celles-ci sont entourées par un milieu plus magnétique qu'elles.

En parlant, dans la théorie de l'électricité, des phenomènes d'induction, nous ferons connaître une action réciproque qui s'exerce entre les aimants et les métaux en mouvement.

CHAPITRE II

MAGNÉTISME TERRESTRE, BOUSSOLES.

544. Action directrice de la terre sur les aimants. — Lorsqu'on suspend une aiguille aimantée à un fil, comme le représente la figure 373, ou lorsqu'on la pose sur un pivot autour duquel elle

peut facilement tourner (fig. 376), on observe que l'aiguille, au lieu de s'arrêter dans une position quelconque, finit toujours par se fixer dans une direction qui est, plus ou moins, celle du nord au sud. La même chose a lieu si, dans un vase plein d'eau, on pose un petit disque de liége, et sur celui-ci un petit barreau aimanté; le liége oscille d'abord, et lorsqu'il s'arrête, la ligne droite qui joint les deux pôles de l'aimant est encore sensiblement dans la direction du nord au sud. Mais il est à observer que, dans cette expérience, le liége et le barreau n'avancent ni vers le nord ni vers le sud. L'action des pôles terrestres sur les aimants n'est donc pas attractive, mais *seulement directrice*.

Des observations analogues ayant été faites sur tous les points du globe, on a assimilé la terre à un immense aimant dont les pôles seraient voisins des pôles terrestres, et dont la ligne neutre coïnciderait sensiblement avec l'équateur. C'est d'après cette hypothèse qu'on a nommé fluide boréal celui qui prédomine au pôle boréal du globe, et fluide austral celui qui prédomine au pôle opposé. Dans cette supposition, la terre agissant sur les aiguilles comme le ferait un aimant, les pôles de même nom se repoussent, et ceux de nom contraire s'attirent (537). Par conséquent, quand une aiguille aimantée se fixe dans la direction du nord au sud, le pôle qui regarde le nord contient le fluide austral, et celui qui regarde le sud contient le fluide boréal. C'est pourquoi le pôle qui regarde le nord se nomme pôle austral, et celui qui regarde le sud, pôle boréal.

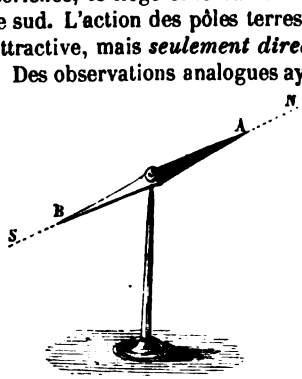


Fig. 376.

545. **Couple magnétique terrestre.** — D'après ce qui précède, il est facile de voir que l'action magnétique de la terre sur une aiguille aimantée peut être comparée à un *couple*, c'est-à-dire à un système de deux forces égales, parallèles et de direction contraire, appliquées aux deux extrémités de l'aiguille. En effet, le pôle boréal du globe agissant par attraction sur le pôle austral de l'aiguille, et par répulsion sur le pôle boréal, il en résulte que les deux pôles de l'aiguille sont sollicités par deux forces contraires, égales et parallèles, car le pôle terrestre est assez éloigné et l'aiguille assez petite pour qu'on puisse admettre comme rigoureusement parallèles les deux droites qui, dans une position quelconque de l'aiguille, joignent ses deux

pôles au pôle nord du globe; donc ce pôle produit l'effet d'un couple. Or, le pôle austral terrestre agissant absolument de la même manière sur les pôles de l'aiguille, il en résulte un second couple, et c'est le couple résultant des deux premiers qui sollicite enfin l'aiguille à prendre une direction déterminée.

546. **Méridien magnétique; déclinaison.** — On sait que le *méridien astronomique* d'un lieu est le plan qui passe par ce lieu et par les deux pôles terrestres, et que la *méridienne* est la trace de ce plan sur la surface du globe. De même, on appelle *méridien magnétique* d'un lieu, le plan qui passe par ce lieu et par les deux pôles d'une aiguille aimantée mobile, en équilibre sur un axe vertical.

Cela posé, le méridien magnétique ne coïncidant pas, en général, avec le méridien astronomique, on nomme *déclinaison de l'aiguille aimantée*, en un lieu, l'angle que fait, en ce lieu, le méridien magnétique avec le méridien astronomique, ou, ce qui revient au même, l'angle que fait la direction de l'aiguille avec la méridienne. La déclinaison est dite *orientale* ou *occidentale*, selon que le pôle austral de l'aiguile est à l'est ou à l'ouest du méridien astronomique.

547. **Variation de la déclinaison.** — La déclinaison de l'aiguille aimantée, très-variable d'un lieu à un autre, est occidentale en Europe et en Afrique, orientale en Asie et dans les deux Amériques. De plus, dans un même lieu, elle présente de nombreuses variations : les unes, qu'on peut considérer comme régulières, sont séculaires, annuelles ou diurnes; les autres, qui sont irrégulières, se désignent sous le nom de *perturbations*.

Variations séculaires. — Pour un même lieu, la déclinaison varie avec le temps, et l'aiguille paraît faire, à l'est et à l'ouest du méridien astronomique, des oscillations dont la durée est de plusieurs siècles. On connaît la déclinaison, à Paris, depuis 1580. Le tableau suivant représente les variations qu'elle a subies :

Années.	Déclinaisons.	Années.	Déclinaisons.
1580.....	11° 30′ à l'est.	1825	22° 22′ à l'onest.
1663.....	0	1830.....	22 12
1700....	8 10 à l'ouest.	1835...	22 4
1780....	19 55	1850.....	20 30
1785.....	22 00	1853.....	20 17
1814.....	22 34	1855 (7 septembre)..	19 57 45″

Ce tableau montre que, depuis 1580, la déclinaison a varié, à Paris, de plus de 34 degrés, et que le maximum de déviation occi-

dentale a eu lieu en 1814; depuis lors l'aiguille revient vers l'orient.

Variations annuelles. — Les variations annuelles ont été signalées par Cassini, qui a observé, en 1784, que de l'équinoxe du printemps au solstice d'été, l'aiguille, à Paris, rétrogradait vers l'est, et qu'au contraire elle avançait vers l'ouest dans les neuf mois suivants. Le maximum d'amplitude observé pendant la même année a été de 20 minutes. Du reste, les variations annuelles sont fort peu connues et ne paraissent pas constantes.

Variations diurnes. — Outre les variations séculaires et annuelles, la déclinaison éprouve des variations diurnes qui sont très-faibles et qu'on ne peut observer que sur de longues aiguilles et à l'aide d'instruments très-sensibles. Dans nos climats, l'extrémité nord de l'aiguille marche tous les jours de l'est à l'ouest, depuis le lever du soleil jusque vers une heure après midi. Elle retourne ensuite vers l'est, par un mouvement rétrograde, de manière à reprendre, à très-peu près, vers dix heures du soir, la position qu'elle occupait le matin. La nuit, l'aiguille ne présente que peu de variations, mais subit cependant, de nouveau, un très-faible déplacement vers l'ouest.

A Paris, l'amplitude moyenne de la variation diurne est, pour avril, mai, juin, juillet, août et septembre, de 13 à 15 minutes, et pour les autres mois, de 8 à 10 minutes. Il y a des jours où elle s'élève à 25 minutes et d'autres où elle ne dépasse pas 5 minutes. Le maximum de déviation n'a pas lieu partout à la même heure. L'amplitude des variations diurnes décroît des pôles vers l'équateur où elle est très-faible. Près de l'équateur, il existe une ligne sans variation diurne.

Variations accidentelles ou *perturbations.* — La déclinaison de l'aiguille aimantée est troublée accidentellement dans ses variations diurnes par plusieurs causes, telles que les aurores boréales, les éruptions volcaniques, la chute de la foudre. L'effet des aurores boréales se fait sentir à de grandes distances. Des aurores, qui ne sont visibles que dans le nord de l'Europe, agissent encore sur l'aiguille, à Paris, où l'on a observé des variations accidentelles de 20 minutes. Dans les régions polaires, l'aiguille oscille quelquefois de plusieurs degrés. Sa marche irrégulière, pendant toute la journée qui précède l'aurore boréale, sert de presage au phénomène.

548. **Boussole de déclinaison.** — La *boussole de déclinaison* est un instrument qui sert à mesurer la déclinaison magnétique en un lieu, quand on connaît le méridien astronomique de ce lieu. Elle se compose d'une boîte AB (fig. 377), de cuivre rouge, dont le fond est

muni d'un cercle gradué M. Au centre est un pivot sur lequel repose une aiguille aimantée *ab*, en forme de losange allongé, et très-légère. A la boîte sont appliqués deux montants qui supportent un axe horizontal X, sur lequel est fixée une lunette astronomique L, mobile dans un plan vertical. La boîte AB est soutenue par un pied

Fig. 377.

P sur lequel elle tourne librement dans le sens horizontal, entraînant la lunette dans son mouvement. Un cercle fixe QR. qu'on nomme *cercle azimutal*, sert à mesurer le nombre de degrés dont la lunette a tourné, au moyen d'un vernier V fixé à la boîte. Enfin, l'inclinaison de la lunette, par rapport à l'horizon se mesure par un vernier K, qui reçoit son mouvement de l'axe de la lunette, et se déplace sur un arc de cercle fixe *x*.

Cela posé, le méridien astronomique d'un lieu étant connu, pour déterminer la déclinaison en ce lieu, on commence par disposer la boussole bien horizontalement, au moyen des vis calantes SS et du

niveau *n*, puis on fait tourner la boîte AB jusqu'à ce que la lunette se trouve dans le plan du méridien astronomique. Lisant alors, sur le limbe gradué M, l'angle que fait l'aiguille aimantée avec le diamètre N, qui correspond au zéro de la graduation et se trouve exactement dans le plan de la lunette, on a la déclinaison ; laquelle est occidentale ou australe, selon que le pôle *a* de l'aiguille s'arrête à l'occident et à l'orient du diamètre N.

Dans le cas où le méridien astronomique du lieu n'est pas connu, on peut le déterminer à l'aide de la boussole même. Pour cela, on fait usage du cercle azimutal QR et de l'arc de cercle *x*, et observant un astre connu, avant et après son passage au méridien, on emploie la *méthode des hauteurs égales* décrite dans les traités de cosmographie pour déterminer la méridienne.

549. **Méthode du retournement.** — Les applications que nous venons d'indiquer, de la boussole de déclinaison, ne sont exactes qu'autant que l'axe magnétique de l'aiguille, c'est-à-dire la droite qui passe par ses deux pôles, coïncide avec l'axe de figure, c'est-à-dire avec la droite qui joint ses deux extrémités. Or, en général, cette condition n'est pas satisfaite. On corrige cette cause d'erreur par la méthode du retournement. Pour cela, l'aiguille n'est pas fixée à la chape, mais lui est seulement superposée, afin qu'on puisse l'enlever et la retourner, en la posant de nouveau sur la chape, de manière que la face inférieure devienne la face supérieure, et réciproquement. Prenant alors la moyenne entre la déclinaison que marque l'aiguille et celle qu'elle marquait d'abord, on a la déclinaison exacte.

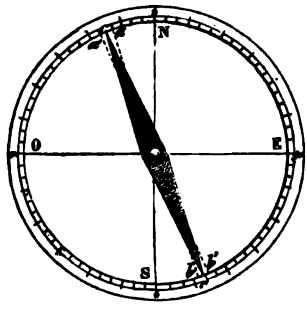


Fig. 378.

En effet, si la droite *ce* représente l'axe de figure de l'aiguille, et la droite *ab* son axe magnétique (fig. 378), la véritable déclinaison n'est pas marquée par l'arc *c*N, qui est trop grand, mais par l'arc *a*N. Or, si l'on retourne l'aiguille, l'axe magnétique *ab* ne prend pas la position *a'b'*, mais revient exactement à sa première direction, tandis que l'extrémité *c*, passant alors entre les points *a* et N, marque un arc trop petit, précisément d'une quantité égale à celle dont le premier arc était trop grand. Par conséquent, la

moyenne entre les deux arcs observés donne la déclinaison vraie.

* 550. **Boussole marine.** — L'action directrice de la terre sur l'aiguille aimantée a reçu une importante application dans la *boussole marine*, connue aussi sous les noms de *compas de variation* et de *compas de mer*. C'est une boussole de déclinaison destinée à diriger la marche des navires sur mer. La figure 379 la représente renfermée dans une boîte rectangulaire qui se place elle-même dans une boîte plus grande qu'on nomme *habitacle*, et qui est fixée sur le pont, à l'arrière du vaisseau. La figure 380 en donne une coupe transversale. Dans ces deux figures, les mêmes lettres indiquent les mêmes pièces.

L'aiguille *ab* (fig. 380), très-mobile sur un pivot, est fixée à la face inférieure d'une feuille de talc *t*, sur laquelle est tracée une étoile ou *rose* à 32 branches, marquant les huit rumbs de vent, les

Fig. 379 (h = 32).

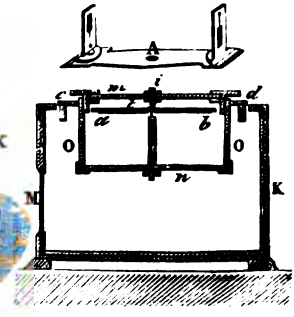


Fig. 380.

demi-rumbs et les quarts. Afin que la boussole puisse toujours conserver sa position horizontale, malgré le roulis et le tangage du navire, elle est à *suspension de Cardan*, c'est-à-dire qu'elle est soutenue par deux anneaux concentriques, mobiles, l'un autour de l'axe *cd* portant sur la boîte même, l'autre autour de l'axe *xz* perpendiculaire au premier et portant sur l'anneau fixé à l'axe *cd*.

Une ouverture M, fermée par une glace de verre dépoli, sert à éclairer la boussole pendant la nuit. Pour cela, une lampe placée hors de la boîte, en regard de la glace, projette sa lumière dans l'intérieur. Le fond *n* de la caisse cylindrique O, dans laquelle est l'aiguille, est une glace de verre poli, laquelle donne passage à la lumière pour éclairer la feuille de talc *t*, qui porte la rose et qui

est transparente. Une seconde glace de verre *m* recouvre la boussole, et un pivot *i*, fixé au centre de cette glace, sert à placer une alidade A, qui n'a d'usage que lorsqu'on veut relever les côtes.

Pour diriger un navire, avec la boussole, on reconnaît d'abord, sur une carte marine, suivant quel rumb de vent le vaisseau doit se diriger pour se rendre à sa destination. Alors, l'œil fixé sur la boussole, le timonier tourne la barre du gouvernail jusqu'à ce que le rumb déterminé, marqué sur la rose, vienne coïncider avec une *ligne de foi* passant par deux points *c* et *d*, marqués sur les bords de la boîte (fig. 379), et dirigée dans le sens de la quille du vaisseau. Toutefois, les variations qu'éprouve la déclinaison sur les différents points du globe, obligent les navigateurs à corriger continuellement les observations qu'ils font avec la boussole.

On ne connaît point l'inventeur de la boussole, ni l'époque précise de son invention. Guyot de Provins, poëte français du XIIe siècle, parle, le premier, de l'usage de l'aimant pour la navigation. Les anciens navigateurs, qui ne connaissaient pas la boussole, n'avaient pour guide que le soleil ou l'étoile polaire : aussi étaient-ils obligés de naviguer constamment en vue des côtes, au risque de faire fausse route quand le ciel était couvert.

551. **Inclinaison ; équateur magnétique.** — D'après la direction vers le nord qu'affecte la boussole de déclinaison, on pourrait penser que la force qui la sollicite vient d'un point de l'horizon ; mais il n'en est pas ainsi, car si l'on dispose l'aiguille de manière qu'elle puisse se mouvoir librement dans un plan vertical, autour d'un axe horizontal, on observe que quoique le centre de gravité de l'aiguile coïncide exactement avec l'axe de suspension, son pôle austral, dans notre hémisphère, incline constamment vers le pôle boréal de la terre. Dans l'autre hémisphère, c'est le pôle boréal de l'aiguille qui incline vers le pôle austral du globe.

Quand le plan vertical dans lequel se meut l'aiguille coïncide avec le méridien magnétique, on nomme *inclinaison* l'angle qu'elle fait avec l'horizon. Dans un autre plan que le méridien magnétique, l'inclinaison augmente, et elle est de 90 degrés dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique. En effet, l'action magnétique de la terre se décomposant alors en deux forces, l'une verticale, l'autre horizontale, la première fait prendre à l'aiguille sa position verticale, tandis que la seconde, agissant dans la direction de l'axe de suspension, ne peut faire tourner l'aiguille.

L'inclinaison, de même que la déclinaison, varie d'un lieu à un autre, mais suivant une loi mieux déterminée. On observe, en effet,

vers le pôle boréal de la terre, des points où l'inclinaison est de 90 degrés; puis, à partir de là, elle décroît avec la latitude jusqu'à l'équateur où elle est nulle, tantôt sur ce cercle même, tantôt en des points qui en sont peu distants. Dans l'hémisphère austral, la déclinaison reparaît, mais en sens contraire, c'est-à-dire que c'est le pôle boréal de l'aiguille qui s'abaisse au-dessous de l'horizon.

On a nommé *équateur magnétique* la courbe qui passe par tous les points où l'inclinaison est nulle, et *pôles magnétiques* les points où l'inclinaison est de 90 degrés. D'après les observations de M. Duperrey, l'équateur magnétique coupe l'équateur terrestre en deux points, presque diamétralement opposés, l'un dans le grand Océan, l'autre dans l'océan Atlantique. Ces points paraissent animés d'un mouvement de translation d'orient en occident. Quant aux pôles magnétiques, il paraît en exister deux, situés l'un au nord de l'Amérique septentrionale, l'autre au nord de la Nouvelle-Hollande, le premier par 70° 10′ de latitude et 100° 40′ de longitude, et le second par 75° de latitude et 136° de longitude.

L'inclinaison varie aussi dans un même lieu, d'une époque à une autre. En 1671, elle était, à Paris, de 75 degrés. Depuis, elle a toujours été en décroissant, et, le 4 décembre 1853, elle était de 66° 28′. D'après les observations faites à l'Observatoire, la diminution annuelle de l'inclinaison est sensiblement de 3 minutes.

En parlant de l'électricité, nous ferons connaître la cause probable du magnétisme terrestre.

552. **Boussole d'inclinaison.** — On nomme *boussole d'inclinaison* un instrument qui sert à mesurer l'inclinaison magnétique. Cette boussole, tout en cuivre, se compose d'abord d'un cercle horizontal *m*, gradué et porté sur trois vis calantes (fig. 381). Au-dessus de ce cercle est un plateau A, mobile autour d'un axe vertical, et portant, à l'aide de deux colonnes, un second cercle gradué M, qui mesure l'inclinaison; un châssis *r* soutient l'aiguille *ab*, et un niveau *n* sert, au moyen de trois vis calantes, à placer horizontalement le diamètre qui passe par les deux zéros du cercle M.

Cela posé, pour observer l'inclinaison, on commence par déterminer le méridien magnétique, ce qui se fait en tournant le plateau A sur le cercle *m* jusqu'à ce que l'aiguille devienne verticale, position qu'elle prend lorsqu'elle est dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique (551). Tournant ensuite le plateau A de 90 degrés sur le cercle *m*, on amène le cercle vertical M dans le méridien magnétique. L'angle *dca* que fait alors l'aiguille aimantée avec le diamètre horizontal, est l'angle d'inclinaison.

Toutefois, il y a ici deux causes d'erreur dont il importe de tenir compte : 1° l'axe magnétique de l'aiguille peut ne pas coïncider avec son axe de figure ; de là une erreur qu'on corrige par la méthode du retournement, de même que pour la boussole de déclinaison (549) ;

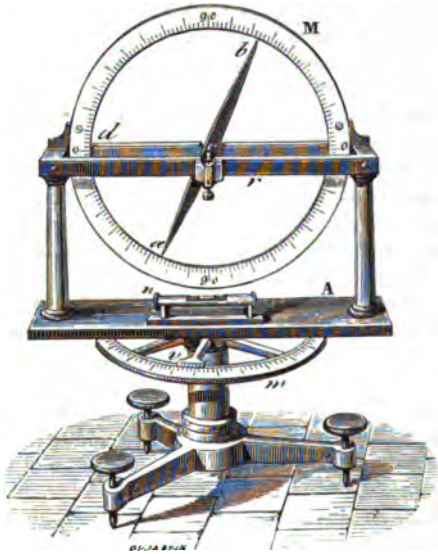


Fig. 381 (h = 41).

2° le centre de gravité de l'aiguille peut ne pas coïncider avec l'axe de suspension, et alors l'angle *dca* est trop petit ou trop grand, selon que le centre de gravité est au-dessus ou au-dessous du centre de suspension ; car, dans le premier cas, l'action de la pesanteur est contraire à celle du magnétisme terrestre pour faire incliner l'aiguille, tandis que dans le second elle est de même sens. On corrige cette erreur en renversant les pôles de l'aiguille, ce qui s'obtient en faisant des frictions avec les pôles contraires de deux barreaux, de manière que chaque pôle de l'aiguille soit frotté par un pôle de même nom que lui. La direction de l'aiguille changeant alors de sens, si son centre de gravité était au-dessus du point de suspension, il est actuellement au-dessous, et l'angle d'inclinaison, qui était trop petit, devient trop grand. On aura donc sa vraie valeur

en prenant la moyenne entre les résultats obtenus dans les opérations qui viennent d'être indiquées.

553. **Aiguille et système astatiques.** — On nomme *aiguille astatique* celle qui est soustraite à l'action magnétique de la terre. Telle serait une aiguille mobile autour d'un axe situé dans le plan du méridien magnétique, parallèlement à l'inclinaison; car le couple magnétique terrestre, agissant alors suivant l'axe, ne peut imprimer à l'aiguille aucune direction déterminée.

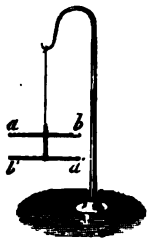


Fig. 382.

Un *système astatique* est la réunion de deux aiguilles de même force, réunies parallèlement, les pôles contraires en regard, comme le montre la figure 382. Si les deux aiguilles sont rigoureusement de même force, les actions contraires du globe sur les pôles a' et b, ainsi que sur les pôles a et b', se détruisent, et le système est complétement astatique. On verra, dans le galvanomètre, une application importante du système magnétique astatique.

CHAPITRE III

AIMANTATION, LOI DES ACTIONS MAGNÉTIQUES.

554. **Sources d'aimantation; saturation.** — Les diverses sources d'aimantation sont l'influence des aimants puissants, le magnétisme terrestre et l'électricité. Nous ne ferons connaître que plus tard cette dernière source d'aimantation; quant à l'aimantation par les aimants, elle s'opère par trois méthodes, celle de la simple touche, celle de la touche séparée et celle de la double touche.

Quelle que soit celle de ces trois méthodes dont on se serve pour aimanter un barreau d'acier, il y a une limite à la puissance magnétique que celui-ci peut acquérir, limite qui dépend de son degré de trempe et de la force des aimants qui servent à l'aimantation. On exprime que cette limite est atteinte en disant que le barreau est aimanté à *saturation*. Lorsque le point de saturation a été dépassé, le barreau y revient bientôt et tend même à descendre au-dessous, si l'on n'entretient pas sa force magnétique à l'aide d'armures, comme on le verra bientôt (559).

555. **Méthode de la simple touche.** — La méthode de la simple

touche consiste à faire glisser le pôle d'un fort aimant d'un bout à l'autre du barreau qu'on veut aimanter, et à répéter plusieurs fois les frictions, toujours dans le même sens. Le fluide neutre se trouve ainsi décomposé successivement dans toute la longueur du barreau, et la dernière extrémité que touche l'aimant mobile présente un pôle contraire à celui avec lequel on a fait les frictions. Ce procédé n'a qu'une faible puissance d'aimantation, d'où il résulte qu'il ne peut être appliqué qu'à de petits barreaux; il a de plus l'inconvénient de développer fréquemment des points conséquents (536).

556. **Méthode de la touche séparée.** — La méthode de la touche séparée, adoptée par Knight, en Angleterre, en 1745, consiste à placer les deux pôles contraires de deux barreaux d'égale force, au milieu du barreau à aimanter, et à les faire glisser simultanément chacun vers un des bouts du barreau, en les tenant verticalement. On reporte ensuite chaque aimant vers le milieu du barreau, et on recommence de la même manière. Après plusieurs frictions semblables sur les deux faces, le barreau est aimanté.

Duhamel a perfectionné cette méthode en plaçant les deux bouts du barreau à aimanter sur les pôles contraires de deux aimants fixes, dont l'action concourt avec celle des aimants mobiles qui servent à opérer les frictions, la position relative des pôles étant la même que dans la figure 383.

Ce procédé est celui qui donne l'aimantation la plus régulière.

557. **Méthode de la double touche.** — Dans la méthode de la double touche, due à Mitchell, les deux aimants qui servent à opérer

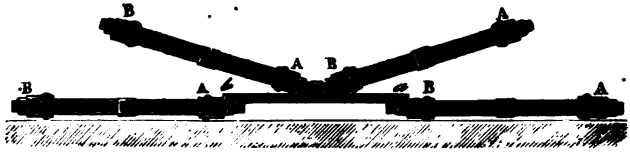


Fig. 383.

les frictions sont encore placés au milieu du barreau à aimanter, leurs pôles contraires en regard; mais au lieu de glisser en sens contraires vers ses extrémités, ils sont maintenus à un intervalle fixe au moyen d'une petite pièce de bois placée entre eux (fig. 383), et glissent ensemble du milieu à une extrémité, puis de celle-ci, à l'autre l'extrémité, et ainsi de suite, de manière que chaque moitié du barreau reçoive le même nombre de frictions.

Æpinus, en 1758, perfectionna cette méthode en plaçant, comme dans le procédé de la touche séparée, deux forts barreaux aimantés sous celui qu'on veut aimanter, et en inclinant les barreaux mobiles d'un angle de 15 à 20 degrés (fig. 383). On aimante ainsi de forts barreaux, mais on obtient souvent des points conséquents.

Remarquons que dans les différents procédés d'aimantation par les aimants, ceux-ci ne perdent rien de leur force, ce qui fait voir que les fluides magnétiques ne passent pas d'un barreau à un autre.

558. **Aimantation par l'action de la terre.** — L'action de la terre sur les substances magnétiques étant comparable à celle des aimants, le magnétisme terrestre tend constamment à séparer les deux fluides qui sont à l'état neutre dans le fer doux et dans l'acier. Mais, dans ce dernier corps, la force coercitive étant très-grande (541), l'action de la terre est insuffisante pour produire l'aimantation. Il n'en est plus de même sur une barre de fer doux, surtout si on la place dans le méridien magnétique parallèlement à l'inclinaison. Les deux fluides sont alors séparés, le fluide austral se portant vers le nord et le fluide boréal vers le sud. Toutefois, ce n'est là qu'une aimantation instable, car si l'on retourne la barre, les pôles sont aussitôt intervertis, la force coercitive du fer doux étant nulle.

Cependant, on parvient à donner au fer doux une force coercitive très-sensible, si, tandis qu'il est sous l'influence de la terre et dans la direction indiquée ci-dessus, on le soumet à une forte torsion, ou si on le bat à froid, sur une enclume, à coup de marteau. Mais la force coercitive ainsi développée est faible et se perd bientôt complétement, ce qui n'a pas lieu pour l'acier.

C'est par l'influence prolongée du magnétisme terrestre qu'on explique la formation des aimants naturels, ainsi que l'aimantation qu'on observe fréquemment dans les vieux objets d'acier ou de fer; car les fers ordinaires du commerce, qui ne sont pas purs, possèdent une faible force coercitive : il en résulte qu'ils présentent presque toujours des traces d'aimantation, ainsi que cela s'observe dans les clous, les pelles, les pinces, etc. La fonte a, en général, une grande force coercitive et s'aimante très-bien.

559. **Faisceaux magnétiques, armures des aimants.** — Un *faisceau magnétique* est un ensemble de barreaux aimantés réunis parallèlement par leurs pôles de même nom. Tantôt on leur donne une forme en fer à cheval (fig. 384), tantôt une forme rectiligne (fig. 385). Le faisceau représenté dans la figure 384 est formé de 5 lames d'acier juxtaposées. Celui de la figure 385 se compose de

12 lames disposées en 3 couches de 4 lames chacune. La forme en fer à cheval est préférable pour faire porter un poids à l'aimant, car les deux pôles sont utilisés en même temps. Dans les deux espèces de faisceaux, les lames sont trempées et aimantées séparément, puis superposées et réunies par des vis ou par des viroles.

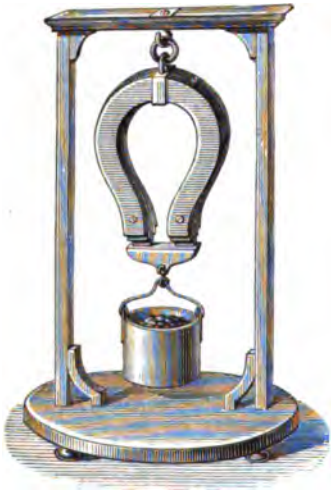


Fig. 384 (h = 61).

La force d'un faisceau n'est pas égale à la somme des forces de chaque barreau, ce qui provient des actions répulsives qu'exercent les uns sur les autres les pôles voisins; on augmente la force d'un barreau en faisant les lames latérales plus courtes de 1 à 2 centimètres que la lame du milieu (fig. 384 et 385).

On nomme *armures*, dans les aimants, des pièces de fer doux A et B (fig. 375) qu'on met en contact avec les pôles pour conserver la puissance magnétique de ceux-ci ou même pour l'augmenter, par suite d'une action par influence.

La figure 386 représente, avec ses armures, une pierre d'aimant

Fig. 385 (l = 40).

naturel; sur les faces qui correspondent aux pôles, sont deux lames de fer doux, terminées chacune par un talon massif. Sous l'influence de l'aimant naturel, ces lames s'aimantent, et les lettres A et B représentant le lieu des pôles de l'aimant naturel, il est facile de voir que les pôles des armures le sont respectivement par les lettres *a* et *b*. Or, ces armures, une fois aimantées, réagissent à leur tour sur le fluide neutre de l'aimant naturel, le décomposent et accroissent ainsi sa puissance magnétique. Sans armure, les aimants naturels sont très-faibles, mais armés ils deviennent capables de

porter des poids qui augmentent progressivement jusqu'à une certaine limite qu'ils ne peuvent dépasser.

Le *portant a'b'*, qui est en fer doux, fait lui-même l'office d'une deuxième armure, car s'aimantant par influence, ses pôles *a'* et *b'* réagissent sur les pôles *a* et *b* de la première.

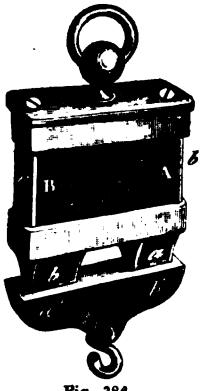


Fig. 386.

Pour armer les aimants artificiels, on les dispose par paire, comme le représente la figure 387, en plaçant en regard les pôles contraires, puis on ferme le circuit avec deux petits barreaux de fer doux A B; ceux-ci s'aimantant par influence, leurs pôles réagissent sur les barreaux aimantés pour leur conserver leur force magnétique. Quant aux aiguilles mobiles (fig. 376), comme elles se dirigent vers les pôles magnétiques du globe, l'influence de celui-ci leur tient lieu d'armure.

* 560. **Lois des attractions et des répulsions magnétiques.** — Coulomb, le premier, a constaté cette loi, que *les attractions et les répulsions magnétiques s'exercent en raison inverse du carré de la distance*, et il l'a démontrée par

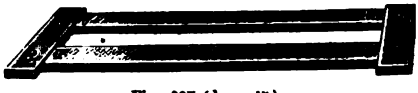


Fig. 387 (1 = 45).

deux méthodes : celle de la balance de torsion et celle des oscillations.

1° ***Méthode de la balance de torsion.*** — La balance de torsion consiste en une cage de verre (fig. 388), recouverte d'une glace qu'on enlève à volonté, et qui est percée, près des bords, d'une ouverture destinée à introduire un aimant *ab*. Au centre de cette même glace est une seconde ouverture à laquelle est adapté un tube de verre, qui peut tourner à frottement doux sur les bords de l'orifice. Ce tube porte, à sa partie supérieure, un *micromètre*. On nomme ainsi un système de deux pièces, dont l'une, D, qui est fixe, est divisée sur son contour en 360 degrés, et l'autre, E, qui est mobile, porte un point de repère qui indique de combien de degrés on fait tourner cette pièce E sur le cadran D. A gauche

du dessin, en *e* et en *d*, sont représentées, sur une plus grande échelle, les deux pièces du micromètre. Au disque *e* sont fixés deux montants traversés par un axe horizontal sur lequel s'enroule un fil d'argent très-fin, qui soutient une aiguille aimantée AB. Enfin, sur le fond de la cage est un cadran divisé qui sert à mesurer les déplacements de l'aiguille AB, et, par conséquent, la torsion du fil d'argent.

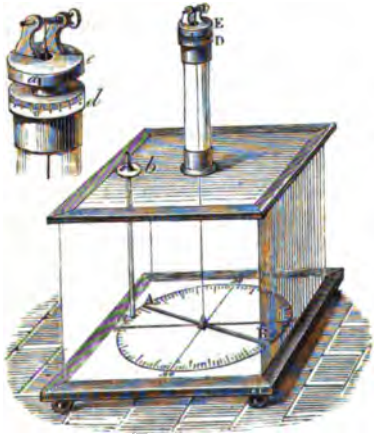


Fig. 388 (h = 56).

Cela posé, le trait de repère *a* du disque *e* étant au zéro du cadran *d*, on commence par placer la cage de manière que le centre et le zéro du cadran inférieur se trouvent dans le méridien magnétique; retirant alors l'aiguille AB de sa chape, on la remplace par une aiguille semblable, de cuivre ou de tout autre métal non magnétique, puis on tourne le tube de verre et avec lui les pièces E et D, de façon que cette aiguille vienne s'arrêter au zéro du cadran inférieur. L'aiguille aimantée *ba* n'étant pas encore en place, on enlève l'aiguille non magnétique qui est dans la chape, et on y remet l'aiguille aimantée AB; celle-ci est alors exactement dans le méridien magnétique, et la torsion du fil d'argent est nulle.

L'appareil ainsi disposé, il est nécessaire, avant d'introduire l'aimant *ab*, de connaître l'action de la terre sur l'aiguille mobile AB, lorsque celle-ci est déviée du méridien magnétique d'un certain nombre de degrés. Pour cela, on tourne la pièce E jusqu'à ce que l'aiguille AB se déplace de 1 degré dans le même sens. Le nombre de degrés moins un, dont on a tourné le micromètre, représente évidemment la torsion totale du fil. Dans les expériences de Coulomb, ce nombre était 35; mais il varie avec la longueur du fil, son diamètre et l'intensité du barreau AB. Or, l'aiguille demeurant actuellement en équilibre, il est évident que la force de torsion du fil est précisément égale et contraire à l'action directrice de la

terre. Donc cette action, dans les expériences de Coulomb, était représentée par 35, pour une déviation de 1 degré; mais la force de torsion étant proportionnelle à l'angle de torsion (70, 2°), et l'action directrice de la terre, une fois qu'il y a équilibre, lui étant égale, il en résulte que cette dernière force, pour des déviations de 2, 3... degrés, est représentée par 2 fois, 3 fois... 35 degrés.

L'action de la terre une fois déterminée, on descend dans la cage l'aimant *ab*, en ayant soin de placer en regard les pôles de même nom. Le pôle A de l'aiguille mobile est repoussé, et si l'on représente par d le nombre de degrés qui mesure l'angle d'écart, quand l'aiguille AB est en équilibre, cette aiguille tend à revenir vers le méridien magnétique avec une force représentée par la somme $d + 35 \times d$, la partie d étant due à la torsion du fil, et la partie $35\,d$ à l'action de la terre; puisqu'elle n'y revient pas, il faut que la force répulsive qui s'exerce entre les pôles a et A soit elle-même égale à $d + 35 \times d$. Cela posé, on tourne le disque E de manière que l'angle de déviation d devienne deux fois plus petit. D'après la position de l'aiguille AB, dans la figure ci-contre, ce serait de droite à gauche qu'il faudrait tourner. En représentant par n le déplacement du disque E, on voit que le fil de suspension est tordu, à son bout supérieur, de n degrés à gauche, et à son bout inférieur, de $\frac{d}{2}$ degrés à droite; sa torsion est donc $n + \frac{d}{2}$. Par conséquent, la force réelle qui tend à ramener l'aiguille vers le méridien magnétique est $\left(n + \frac{d}{2}\right) + 35 \times \frac{d}{2}$, la partie $n + \frac{d}{2}$ représentant la force de torsion, et la partie $35 \times \frac{d}{2}$ l'action de la terre. Or, l'aiguille ne revenant pas vers le méridien, il faut que la force répulsive qui s'exerce entre les deux pôles a et A soit elle-même représentée par $\left(n + \frac{d}{2}\right) + 35 \times \frac{d}{2}$.

Cela posé, en effectuant les calculs, c'est-à-dire en remplaçant n et d par les nombres que fournit l'expérience, on trouve que la quantité $\left(n + \frac{d}{2}\right) + 35 \times \frac{d}{2}$ est précisément le quadruple de la quantité $d + 35 \times d$, obtenue dans la première expérience; la loi de Coulomb est donc démontrée, car on expérimente sur des arcs d et $\frac{d}{2}$ assez petits pour se confondre sensiblement avec leurs cordes, c'est-à-dire que lorsque l'arc devient deux fois plus petit,

il en est sensiblement de même de la distance aA des pôles.

2° *Méthode des oscillations.* — Cette méthode consiste à faire osciller une aiguille aimantée pendant des temps égaux, d'abord sous l'influence seule de la terre, puis sous l'influence combinée de la terre et du pôle attractif d'un aimant placé successivement à deux distances inégales. Des trois nombres d'oscillations observées, on déduit ensuite, par le calcul, la loi de Coulomb.

* 561. **Mesure du magnétisme terrestre.** — Un grand nombre de physiciens et de navigateurs se sont occupés de mesurer l'intensité magnétique du globe en différents lieux et à différentes époques. Plusieurs méthodes ont été adoptées, qui reviennent à faire osciller une aiguille d'inclinaison ou de déclinaison pendant un temps donné, et à déduire des nombres d'oscillations les intensités relatives. Les observations ont conduit aux lois suivantes :

1° L'intensité du magnétisme terrestre augmente à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur magnétique, et elle paraît être une fois et demie plus grande aux pôles que sur cette ligne ; la ligne sans inclinaison est donc en même temps la ligne de moindre intensité.

2° L'intensité magnétique du globe décroît à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, et ce décroissement suit probablement la loi du rapport inverse du carré des distances.

3° L'intensité magnétique de la terre varie avec les heures de la journée ; elle atteint son minimum entre dix et onze heures du matin, et son maximum entre quatre et cinq heures de l'après-midi.

4° L'intensité magnétique présente des variations irrégulières, et, comme la déclinaison et l'inclinaison, elle éprouve des perturbations accidentelles par l'influence des aurores boréales.

On a nommé *lignes isodynamiques* des lignes qui, sur la surface du globe, présentent en tous leurs points la même intensité magnétique ; *lignes isogones*, celles qui présentent partout la même déclinaison, et *lignes isoclines*, celles d'égale inclinaison. M. Duperrey a construit neuf courbes isodynamiques au nord et autant au sud de l'équateur magnétique, et il a trouvé que ces lignes, par leur courbure et leur direction, ont une grande analogie avec les lignes *isothermes*, c'est-à-dire d'égale température.

LIVRE XI

ÉLECTRICITÉ A L'ÉTAT STATIQUE

CHAPITRE PREMIER

PRINCIPES FONDAMENTAUX.

562. **Électricité, hypothèse sur sa nature.** — L'*électricité*[1] est un agent physique puissant, dont la présence se manifeste par des attractions et des répulsions, par des apparences lumineuses, par des commotions violentes, par des décompositions chimiques et par un grand nombre d'autres phénomènes. Les causes qui développent de l'électricité sont le frottement, la pression, les actions chimiques, la chaleur, le magnétisme et l'électricité elle-même.

Le philosophe Thalès, 600 ans avant l'ère chrétienne, avait déjà remarqué la propriété qu'a l'ambre jaune frotté d'attirer les corps légers. En parlant de cette substance, Pline dit : « Quand le frottement lui a donné la chaleur et la vie, elle attire les brins de paille, comme l'aimant attire le fer. » Mais là se bornèrent les connaissances des anciens sur l'électricité. Ce n'est qu'à la fin du seizième siècle que Gilbert, médecin de la reine Élisabeth, à Londres, appela de nouveau l'attention des physiciens sur les propriétés de l'ambre jaune, en faisant voir que beaucoup d'autres substances peuvent aussi acquérir la propriété attractive par le frottement. L'impulsion une fois donnée, les découvertes se succédèrent aussi nombreuses que rapides. Les savants qui, depuis Gilbert, ont plus particulièrement contribué aux progrès de l'électricité, sont Otto de Guéricke, Dufay, Æpinus, Franklin, Coulomb, Volta, Davy, Œrsted, Ampère, Schweigger, Seebek, MM. de La Rive, Faraday et Becquerel. C'est à ce dernier savant et à Davy qu'est due presque toute l'électro-chimie.

1. Le mot *électricité* vient du grec ἤλεκτρον, qui signifie succin, ou ambre jaune, parce que c'est sur cette substance qu'on a observé, pour la première fois, la propriété de développer de l'électricité par le frottement. L'ambre jaune, qui ne se rencontre plus qu'à l'état fossile, a beaucoup de rapport avec la résine *copale*. On le trouve surtout sur les rivages de la mer Baltique, où il est rejeté par les flots, et aussi sur les côtes de Sicile.

Malgré les nombreux travaux dont l'électricité a été l'objet, on ne connaît point l'origine et la nature de cet agent. De même que pour le calorique, la lumière et le magnétisme, les physiciens sont réduits à des hypothèses. Newton pensait que la production de l'électricité était le résultat d'un principe éthéré mis en mouvement par les vibrations des particules des corps. L'abbé Nollet, se fondant sur les effets lumineux et calorifiques de l'électricité, la regardait comme une modification particulière du calorique et de la lumière. Nous ferons connaître bientôt (568) la théorie de Symmer, dans laquelle on admet l'existence de deux fluides électriques, et celle de Franklin, dans laquelle on n'admet qu'un seul fluide.

563. **Électricité statique et électricité dynamique.** — Abstraction faite de toute hypothèse, l'étude de l'électricité se partage en deux grandes divisions, comprenant, l'une, les phénomènes que présente l'*électricité statique* ou en repos, l'autre, ceux que présente l'*électricité dynamique* ou en mouvement. A l'état statique, l'électricité a surtout pour cause le frottement; elle s'accumule alors à la surface des corps, et s'y maintient en équilibre à un état de *tension* qui se manifeste par des attractions et par des étincelles. A l'état dynamique, l'électricité résulte principalement d'actions chimiques, et traverse les corps sous forme de *courant*, avec une vitesse comparable à celle de la lumière. Elle se distingue alors de l'électricité statique particulièrement par des phénomènes chimiques et par ses rapports avec le magnétisme.

Nous traiterons d'abord de l'electricité statique, en considérant plus particulièrement celle qui est développée par le frottement, et nous dirons qu'un corps est *électrisé* quand il possède la propriété d'attirer les corps légers, ou de produire des effets lumineux.

564. **Développement de l'électricité par le frottement.** — Un grand nombre de substances, quand on les frotte avec un morceau de drap ou avec une peau de chat, acquièrent immédiatement la propriété d'attirer les corps légers, comme les barbes de plume, les brins de paille. Cette propriété se remarque surtout dans l'ambre jaune, la cire à cacheter, la résine, la gutta-percha, le soufre, le verre, la soie et plusieurs autres substances.

On reconnaît qu'un corps est électrisé au moyen de petits instruments qu'on nomme *électroscopes*, et dont le plus simple est le *pendule électrique* (fig. 389). Cet appareil consiste en une petite balle de moelle de sureau suspendue, par un fil de soie, à un sup-

port à pied de verre. Lorsqu'on approche un corps électrisé, la petite balle est d'abord attirée, puis repoussée aussitôt qu'il y a eu contact.

Un corps solide peut aussi s'électriser par le frottement avec un liquide ou un gaz : dans le vide barométrique, le mouvement du mercure électrise le verre, un tube vide d'air, dans lequel on a renfermé quelques globules de mercure, devient lumineux dans l'obscurité lorsqu'on agite le mercure. Quant aux gaz, Wilson avait trouvé qu'un courant d'air dirigé sur une tourmaline, du verre, de la résine, électrisait ces substances positivement; mais M. Faraday a reconnu depuis qu'il n'y a d'effet électrique qu'autant que l'air est humide, ou tient en suspension des poudres sèches.

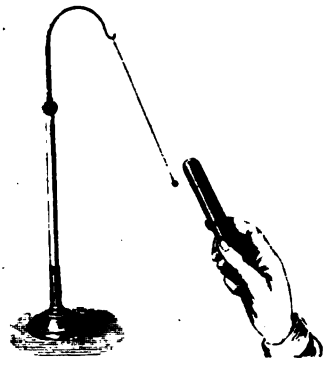


Fig. 389.

Le frottement ne paraît pas d'abord développer d'électricité sur plusieurs substances, et particulièrement sur les métaux, car si, tenant d'une main une barre de métal, on la frotte avec un morceau de drap, on ne remarque aucune trace d'attraction lorsqu'on la présente au pendule électrique. Il ne faudrait pas en conclure que les métaux ne s'électrisent pas par le frottement; c'est là, en effet, une propriété générale pour tous les corps, mais qui ne se manifeste pour beaucoup d'entre eux, ainsi qu'on le verra bientôt (566), qu'autant qu'ils sont placés dans des conditions convenables.

On ignore la cause du développemennt de l'électricité par le frottement. Wollaston l'a attribué à une oxydation, mais Gray avait fait voir avant lui que le frottement développe de l'électricité dans le vide, et Gay-Lussac a reconnu qu'il peut aussi en développer dans l'acide carbonique sec.

565. **Corps conducteurs et corps non conducteurs.** — Lorsqu'on présente au pendule électrique un bâton de cire à cacheter frotté par un bout, on remarque qu'il n'attire que par l'extrémité qui a été frottée; celle qui ne l'a pas été ne donne aucun signe soit d'attraction, soit de répulsion. Il en est de même avec un tube de verre, un bâton de soufre, tant qu'ils n'ont pas été frottés dans toute leur

longueur. On conclut de là que, dans ces corps, la propriété électrique ne se propage pas d'une partie à l'autre, ce qu'on exprime en disant qu'ils ne *conduisent* pas l'électricité. Au contraire, l'expérience montre qu'aussitôt qu'un corps métallique a acquis sur un de ses points la propriété électrique, instantanément elle se propage sur toute la surface du corps quelle que soit son étendue, c'est-à-dire que les métaux *conduisent* bien l'électricité.

De là, la distinction de corps *bons conducteurs* et de corps *mauvais conducteurs*. Les meilleurs conducteurs sont les métaux, l'anthracite, la plombagine, le coke, le charbon de bois bien calciné, les pyrites, la galène; puis les dissolutions salines, dont le pouvoir conducteur est plusieurs milliers de fois moindre que celui des métaux, l'eau à l'état de vapeur et à l'état liquide, le corps humain, les végétaux et tous les corps humides. Les corps mauvais conducteurs sont le soufre, la résine, la gomme laque, le caoutchouc, la gutta-percha, l'essence de térébenthine, la soie, le verre, les pierres précieuses, le charbon non calciné, les huiles, les gaz secs; mais l'air et les gaz sont d'autant moins isolants (566) qu'ils sont plus humides. Du reste, le degré de conductibilité des corps ne dépend pas seulement de la substance dont ils sont formés, mais encore de leur température et de leur état physique. Par exemple, le verre, qui est très-mauvais conducteur à la température ordinaire, conduit lorsqu'il est chauffé au rouge. De même la gomme laque et le soufre perdent en partie la propriété d'isoler lorsqu'on les chauffe. L'eau, qui conduit très-bien à l'état liquide, est mauvais conducteur à l'état de glace sèche. Le verre pulvérisé et la fleur de soufre conduisent assez bien.

566. **Corps isolants; réservoir commun.** — Les corps mauvais conducteurs ont reçu le nom de *corps isolants*, ou d'*isoloirs*, parce qu'on les emploie comme supports lorsqu'il s'agit de conserver à un corps conducteur son électricité. Cette condition est indispensable, car la terre étant formée de substances qui conduisent l'électricité, aussitôt qu'un corps conducteur électrisé communique avec elle par un autre corps conducteur, l'électricité s'écoule immédiatement dans le sol, qu'on nomme, à cause de cela, *réservoir commun*. On isole un corps en le soutenant sur des pieds de verre, en le suspendant à des cordons de soie, ou en le posant sur des gâteaux de résine. Toutefois, les plus mauvais conducteurs n'isolent jamais complétement, d'où il résulte que tout corps électrisé perd toujours plus ou moins lentement son électricité au travers des supports sur lesquels il repose; il y a, en outre, déperdi-

tion par la vapeur d'eau qui est dans l'air, et c'est ordinairement la déperdition la plus abondante.

C'est à cause de leur grande conductibilité qu'on ne peut obtenir d'électricité sur les métaux par le frottement, si l'on n'a soin de les isoler et de les frotter avec un corps non conducteur, comme la soie ou le taffetas ciré. Mais si l'on satisfait à ces conditions, les métaux s'électrisent très-bien par le frottement. Pour le démontrer, on fixe un tube de cuivre jaune à un manche de verre (fig. 390), et, tenant ce dernier à la main, on frotte le tube métallique avec un morceau de soie ou de taffetas ciré; en l'approchant

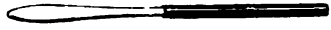


Fig. 390 (l = 50).

ensuite du pendule électrique, on observe une attraction qui montre que le métal est électrisé. Si l'on tient le métal à la main, il y a bien encore production d'électricité, mais elle se perd immédiatement dans le sol.

On donnait anciennement aux corps isolants le nom de corps *idio-électriques* (propres à l'électricité), parce qu'on les croyait seuls doués de la propriété de s'électriser par le frottement, et aux corps bons conducteurs, le nom de corps *anélectriques* (privés d'électricité). Aujourd'hui qu'on sait que tous les corps s'électrisent par le frottement, ces dénominations ne doivent plus être usitées.

567. **Distinction de deux espèces d'électricité.** — On a vu (564) que, lorsqu'on présente au pendule électrique un tube de verre frotté avec un morceau de drap, il y a attraction d'abord, puis répulsion aussitôt après le contact. Les mêmes effets se produisant avec un bâton de cire à cacheter frotté de la même manière, il semble d'abord, dans ces deux expériences, que l'électricité développée sur le verre est identique à celle qui est développée sur la résine. Or, en poussant plus loin l'observation, on reconnaît qu'il n'en est pas ainsi. En effet, le tube de verre et le bâton de résine ayant été électrisés comme il vient d'être dit, si, tandis que le pendule électrique est repoussé par le verre, on approche la résine, celle-ci attire vivement la balle de sureau ; de même, si au pendule repoussé par la résine après qu'il l'a touchée, on présente le tube de verre, on observe une forte attraction : c'est-à-dire qu'un corps repoussé par l'électricité du verre est attiré par l'électricité de la

résine, et, réciproquement, qu'un corps repoussé par l'électricité de la résine est attiré par celle du verre.

Se fondant sur les faits qui viennent d'être décrits, Dufay, physicien français, reconnut, le premier, en 1734, l'existence de deux électricités de nature différente : l'une qui se développe sur le verre quand on le frotte avec de la laine, l'autre qui se développe sur la résine ou sur la cire d'Espagne quand on les frotte avec un morceau de drap ou une peau de chat; la première a reçu le nom d'*électricité vitrée*, la seconde celui d'*électricité résineuse*.

568. **Théories de Symmer et de Franklin.** — Pour expliquer les effets contraires que présente l'électricité à l'état d'électricité vitrée et à celui d'électricité résineuse, Symmer, physicien anglais, a admis deux *fluides électriques*, chacun agissant par répulsion sur lui-même et par attraction sur l'autre. Selon ce physicien, ces fluides existent dans tous les corps à l'état de combinaison, formant ce qu'on nomme le *fluide neutre* ou le *fluide naturel*. Différentes causes, qui sont surtout le frottement et les actions chimiques, peuvent les séparer, et c'est alors qu'apparaissent les phénomènes électriques; mais ces fluides ont une grande tendance à se réunir pour former de nouveau du fluide neutre.

Les deux fluides électriques se désignent sous les noms de *fluide vitré* et de *fluide résineux*. On leur donne aussi ceux de *fluide positif* et de *fluide négatif*, expressions empruntées à la théorie de Franklin. Ce physicien, qui ne considérait qu'un seul fluide agissant par répulsion sur ses propres molécules et par attraction sur celles de la matière, admettait que tous les corps contiennent, à l'état latent, une quantité déterminée de ce fluide : quand elle augmente, les corps sont électrisés *positivement*, et possèdent les propriétés de l'électricité vitrée; quand elle diminue, les corps sont électrisés *négativement*, et présentent les propriétés de l'électricité résineuse. La dénomination d'*électricité positive*, ou de *fluide positif*, équivaut donc à celle d'*électricité vitrée*; et la dénomination d'*électricité négative*, ou de *fluide négatif*, à celle d'*électricité résineuse*. L'électricité positive se représente par le signe + (*plus*), et l'électricité négative par le signe — (*moins*), en se fondant sur ce qu'ainsi qu'en algèbre, en ajoutant $+a$ à $-a$ on a zéro, de même en donnant à un corps qui possede déjà une certaine quantite d'électricité positive, une quantité égale d'électricité négative, on obtient l'état neutre, c'est-à-dire zéro électricité. La théorie de Symmer sur les deux fluides électriques se prête avec une grande simplicité à l'explication des phénomènes : aussi

est-elle généralement admise dans les écoles, du moins en France. Cependant, on ne doit pas oublier que ce n'est là qu'une hypothèse. D'ailleurs, il faut bien avouer tout ce qu'a de vague cette dénomination de *fluide* appliquée aux causes du calorique, de la lumière, du magnétisme et de l'électricité. Qu'est-ce, en effet, qu'un fluide? quelle est sa nature? Aucun physicien n'a donné de renseignement à ce sujet. On doit donc se borner à regarder l'hypothèse des deux fluides électriques comme exprimant deux états, dans lesquels l'électricité se présente sous l'aspect de deux forces égales et contraires tendant à se faire équilibre « Il est bien probable, dit M. de La Rive dans son grand *Traité d'Électricité*, que l'électricité, au lieu de consister en un ou deux fluides spéciaux, n'est que le résultat d'une modification particulière dans l'état des corps; modification qui dépend probablement de l'action mutuelle qu'exercent les unes sur les autres les particules pondérables de la matière et le fluide subtil qui les entoure de toutes parts, qu'on désigne sous le nom d'*éther*, et dont les ondulations constituent la lumière et la chaleur. » — Plus loin, le même physicien ajoute : « Tous les phénomènes des électricités positive et négative peuvent probablement être expliqués par l'action et la réaction d'une force capable d'être manifestée, à divers degrés, dans différentes substances, plus simplement que par l'hypothèse des fluides impondérables. Les deux forces opposées de l'électricité ressemblent en fait à l'action et à la réaction, en ce qu'elles s'accompagnent toujours. »

569. **Actions des corps électrisés les uns sur les autres.** — L'hypothèse de deux espèces d'électricités admise, les effets d'attraction et de répulsion que présentent les corps électrisés (567) se résument dans l'énoncé du principe suivant, qui sert de base à la théorie de tous les phénomènes que nous offre l'électricité statique :

Deux corps chargés de la même électricité se repoussent, et deux corps chargés d'électricité contraire s'attirent ; mais ces attractions et ces répulsions n'ont lieu qu'en vertu de l'action des deux électricités entre elles, et non en vertu de leur action sur les molécules de la matière.

570. **Loi de l'électrisation par le frottement.** — Lorsqu'on frotte ensemble deux corps de nature quelconque, le fluide neutre de chacun est décomposé, et toujours *l'un des corps prend le fluide positif et l'autre le fluide négatif.*

Pour le démontrer, on communique au pendule électrique une électricité connue, et on lui présente séparément les deux corps frottés, qui doivent être isolés dans le cas où ils sont conducteurs:

or, l'un des deux attire la balle du sureau, et l'autre la repousse, ce qui montre qu'ils sont chargés d'électricités contraires. De plus, ils le sont en quantité égale, car si on les représente au pendule tandis qu'ils sont en contact, il n'y a ni attraction ni répulsion, ce qui prouve que les deux électricités se font équilibre. Cette expérience se fait ordinairement avec deux disques de verre, qu'on frotte l'un contre l'autre et qu'on sépare brusquement.

L'électricité développée sur un corps, par le frottement, varie avec la nature du corps frotté. Le verre poli, frotté avec de la laine, s'électrise positivement; frotté de la même manière, le verre dépoli s'électrise négativement. L'espèce d'électricité développée dépend aussi de la nature du frottoir. Les substances ci-après s'électrisent positivement lorsqu'elles sont frottées par celles qui les suivent, et négativement quand elles le sont par celles qui les précèdent : peau de chat, verre poli, laine, plume, bois, papier, soie, gomme laque, verre dépoli.

L'espèce d'électricité dégagée par le frottement dépend encore du degré de poli, du sens des frictions et de la température. En effet, si l'on frotte l'un contre l'autre deux plateaux de verre inégalement polis, c'est celui dont la surface est la plus polie qui prend l'électricité positive, l'autre s'électrise négativement. Si l'on frotte en croix, l'un sur l'autre, deux rubans de soie blanche, pris dans la même pièce, celui qui est frotté transversalement s'électrise négativement et l'autre s'électrise positivement. Quant on frotte l'un contre l'autre deux corps de même substance, dont la surface a le même degré de poli, mais dont la température est différente, c'est la substance la plus échauffée qui prend le fluide négatif. En général, c'est le corps dont les particules peuvent se déplacer plus facilement qui s'électrise négativement.

* 571. **Développement de l'électricité par la pression et par le clivage.** — Æpinus, le premier, constata le développement de l'électricité par la pression; Libes, depuis, montra qu'en pressant légèrement, sur un disque de bois recouvert de taffetas gommé, un disque de métal isolé à l'aide d'un manche de verre, ce disque s'électrisait négativement. Haüy fit voir ensuite que le spath d'Islande s'électrise positivement lorsqu'on le presse un instant entre les doigts, et que ce cristal conserve l'état électrique pendant plusieurs jours. Il reconnut la même propriété dans plusieurs espèces minérales; mais M. Becquerel a trouvé qu'elle appartient à tous les corps, même à ceux qui sont conducteurs, pourvu qu'ils soient isolés. Le liége et le caoutchouc, pressés l'un contre l'autre, pren-

nent, le premier, l'électricité positive, le second, l'électricité négative. Un disque de liége, pressé sur une orange, emporte avec lui une quantité considérable de fluide positif, lorsqu'on interrompt vivement le contact; mais si l'on n'enlève que lentement le disque de liége, la quantité d'électricité est très-faible, ce qui provient de ce que les deux fluides séparés sur les deux corps par la pression se recomposent en partie au moment où elle cesse. C'est par cette raison que l'effet est nul quand les substances pressées sont toutes les deux conductrices de l'électricité.

M. Becquerel a encore observé que le *clivage*, c'est-à-dire la division naturelle des substances minérales cristallisées, peut être une source d'électricité. Si l'on clive rapidement une feuille de mica dans l'obscurité, on observe une faible lueur phosphorescente. Pour s'assurer que le phénomène a bien pour cause l'électricité, M. Becquerel a fixé, avant leur séparation, chaque lame à un manche de verre; les séparant ensuite rapidement et les présentant au pendule électrique ou à un électroscope à feuilles d'or (584), il a trouvé qu'elles possèdent une électricité contraire.

Le talc feuilleté et toutes les substances cristallisées, peu conductrices, s'électrisent aussi par le clivage. En général, toutes les fois qu'on sépare deux molécules, chacune d'elles prend une espèce d'électricité différente, à moins que le corps auquel elles appartiennent ne soit bon conducteur, car alors la séparation ne peut être assez rapide pour s'opposer à la recomposition des deux électricités. C'est au phénomène que nous venons de décrire qu'il faut rapporter la lumière que répand le sucre quand on le casse dans l'obscurité.

CHAPITRE II

MESURE DES FORCES ÉLECTRIQUES.

572. **Lois des attractions et des répulsions électriques.** — Les actions mutuelles qui s'exercent entre les corps électrisés sont soumises aux deux lois suivantes :

1° *Les répulsions et les attractions entre deux corps électrisés sont en raison inverse du carré de la distance;*

2° *La distance restant la même, ces mêmes forces sont en raison composée des quantités d'électricité que possèdent les deux corps.*

Première loi. — Ces deux lois ont été démontrées par Coulomb.

au moyen de la balance de torsion déjà employée pour la démonstration des lois des attractions et des répulsions magnétiques (560). La seule modification qu'il soit nécessaire d'apporter ici à la balance de Coulomb, c'est que l'aiguille aimantée suspendue au fil métallique est remplacée par un bâton de gomme laque terminé par un petit disque de clinquant *n* (fig. 391), et qu'à l'aiguille aimantée verticale on substitue un tube de verre *t*, terminé par une boule de cuivre *m*. La figure 391 présente encore quelques autres modifications par rapport à la figure 388, mais elles sont arbitraires : la cage est cylindrique au lieu d'être rectangulaire, le cadran est tracé sur le contour de la cage, au lieu de l'être sur le fond; enfin, le micromètre se compose d'un petit disque gradué *e*, mobile indépendamment du tube *d*, et d'un repère *a* fixe et servant à marquer de combien de degrés on tourne le disque *e*. Au centre de celui-ci est un petit bouton qui tourne avec lui, et dont le pied pince l'extrémité du fil métallique qui porte l'aiguille *on*.

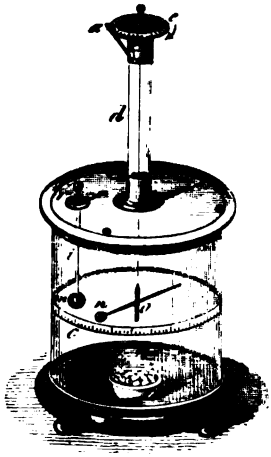


Fig 391 (h = 58).

Cela posé, pour démontrer la première loi ci-dessus, on commence par dessécher l'air qui est dans l'appareil, afin de diminuer la déperdition de l'électricité, ce qu'on obtient en plaçant sous la cage, pendant plusieurs jours, une capsule remplie de chaux vive. Lorsque l'air est complétement desséché et que le zéro du micromètre correspond au repère *a*, on tourne le tube *d*, qui est mobile, jusqu'à ce que l'aiguille *on* soit dirigée vers le zéro du cercle gradué *c*, position à laquelle correspond la boule *m* lorsqu'elle est dans la cage. Retirant alors cette boule, en ayant soin de la tenir par le tube isolant *t*, on l'électrise en la mettant en contact avec une source d'électricité, avec la machine électrique par exemple; puis on la porte de nouveau dans la cage par une ouverture *r*, pratiquée dans le plateau qui la recouvre. Aussitôt, le disque *n* est attiré, puis, s'électrisant au contact de la boule, il est repoussé, et, après quelques oscillations, s'arrête lorsque la torsion du fil fait équilibre à la force répulsive qui s'exerce entre le disque et la boule. Supposons

que la torsion marquée alors par l'aiguille, sur le cadran *c*, soit de 20 degrés, la torsion du fil étant proportionnelle à la force de torsion (70, 2°), ce nombre 20 peut être regardé comme représentant la répulsion électrique à la distance où est l'aiguille. Pour mesurer cette force à une distance moindre, on tourne le disque *e*, dans le sens de la flèche, jusqu'à ce que la distance du clinquant *n* à la boule *m* ne soit plus que de 10 degrés, c'est-à-dire deux fois moindre. Or, pour amener l'aiguille à ce point, on trouve qu'il faut tourner de 70 degrés. Le fil métallique est donc tordu, à son extrémité supérieure, de 70 degrés dans le sens de la flèche, et de 10 degrés en sens contraire à sa partie inférieure. Par conséquent, les deux torsions s'ajoutent pour donner une torsion totale de 80 degrés, c'est-à-dire quadruple de celle qui correspond à une distance double; d'ailleurs, la force de torsion étant toujours égale et contraire à la répulsion, il faut que celle-ci soit elle-même devenue quatre fois plus grande pour une distance deux fois moindre. On vérifie de même que pour une distance trois fois moindre, la répulsion est neuf fois plus grande, ce qui démontre la loi des répulsions.

La loi des attractions peut se démontrer par la même méthode, mais il faut donner à la boule et au disque des électricités contraires.

Deuxième loi. — Pour démontrer que les forces électriques sont proportionnelles aux quantités d'électricité que possèdent les corps, on électrise encore la boule de cuivre *m*, puis, notant la répulsion imprimée à l'aiguille *on*, on retire la boule *m*, et on la touche avec une seconde boule de cuivre de même diamètre, à l'état neutre, et isolée à l'aide d'un manche de verre. La boule *m* cède alors la moitié de son électricité à l'autre, puisque les surfaces des deux boules sont égales (577). Or, en rapportant la première dans la cage, on trouve que la répulsion n'est plus que la moitié de ce qu'elle était d'abord. Si l'on enlève de nouveau à la boule *m* la moitié de l'électricité qui lui reste, la répulsion n'est plus que le quart de la répulsion primitive, et ainsi de suite, ce qui démontre la loi.

Dans ces expériences, on prend pour l'intervalle des corps électrisés l'arc qui mesure la torsion, c'est-à-dire qu'on prend les arcs pour leurs cordes, ce qui n'est qu'approché; mais l'erreur n'influe pas d'une manière sensible sur les résultats, les arcs étant assez petits pour qu'on puisse les substituer à leurs cordes.

* 573. **Objections aux lois de Coulomb.** — M. Harris, en Angleterre, a fait, il y a déjà un certain nombre d'années, de nombreuses expériences pour véri-

fier les lois de Coulomb. Le savant anglais a fait usage d'un appareil ayant du rapport avec la balance de Coulomb, mais qui en diffère en ce que l'aiguille mobile, au lieu d'être suspendue à un seul fil, est soutenue, de même que l'avait déjà fait Gauss dans son *magnétomètre*, par deux fils de cocon, parallèles, très-rapprochés l'un de l'autre, et à égale distance du centre de gravité de l'aiguille; d'où le nom de *balance bifilaire* donné à cet appareil. De ce mode de suspension, il résulte que dès que l'aiguille mobile est repoussée ou attirée, les deux fils ne pouvant plus conserver leur position verticale, s'inclinent plus ou moins, selon l'intensité de la force qui agit sur l'aiguille, et que par suite celle-ci s'élève jusqu'à ce que l'équilibre s'établisse entre la pesanteur qui tend à l'abaisser et la force électrique qui tend à la faire remonter par l'effet de la déviation des fils. Or, M. Harris a constaté que les oscillations de l'aiguille sont alors isochrones, et que la force qui la maintient à une certaine distance angulaire de sa position d'équilibre est proportionnelle à cette distance.

M. Harris a aussi expérimenté avec une simple balance ordinaire, très-sensible, en faisant équilibre, au moyen de poids placés dans l'un des plateaux, aux attractions électriques qui s'exerçaient sur un disque fixé à l'autre plateau.

Or, en expérimentant avec ces deux appareils, M. Harris a trouvé que la première loi de Coulomb, celle de l'inverse du carré de la distance, ne se vérifie plus quand les deux corps électrisés sont chargés de quantité inégale d'électricité, quand la tension électrique est très-faible, et enfin quand la distance angulaire des deux corps est moindre que 9 à 10 degrés. M. Harris a aussi observé que, dans les mêmes circonstances, la seconde loi de Coulomb, celle relative aux quantités d'électricité, ne se vérifie pas non plus.

Dans l'ouvrage déjà cité plus haut, M. de La Rive observe que ces exceptions aux lois de Coulomb ne sont qu'apparentes; qu'elles tiennent à l'influence que les deux corps électrisés exercent l'un sur l'autre, influence qui tend à décomposer le fluide neutre (583), mais qui cesse d'être appréciable quand les deux corps sont assez éloignés; qu'enfin les lois de Coulomb ne sont rigoureusement applicables qu'à des points mathématiques, et que dès lors elles ne peuvent se vérifier que pour des corps de très-petites dimensions.

C'est ce que confirment les expériences de M. Marié Davy qui, ayant répété celles de M. Harris, a reconnu que la loi des distances se vérifie très-approximativement pour deux sphères égales, distantes de plus de 9 ou 10 fois leur rayon.

574. **L'électricité se porte à la surface des corps.** — Lorsqu'un corps isolé, de forme quelconque, est électrisé, soit positivement, soit négativement, le fluide électrique se porte à la surface du corps, où il forme une couche d'une épaisseur extrêmement mince. Cette accumulation de l'électricité, tout entière à la surface, se démontre par les expériences suivantes, dont les deux premières sont dues à Coulomb :

1° On prend une sphère de cuivre creuse, isolée sur un pied de verre et percée, à sa partie supérieure, d'une ouverture circulaire (fig. 392). Après l'avoir électrisée en la mettant en contact avec une source électrique, on la touche successivement, à l'intérieur et à l'extérieur, avec un *plan d'épreuve*. On nomme ainsi un bâton de gomme laque à l'extrémité duquel est fixé un petit disque de clinquant qui sert à recueillir l'électricité. Or, en touchant exté-

rieurement, avec le plan d'épreuve, la sphère électrisée, Coulomb recueillait de l'électricité, car ce plan étant présenté à l'aiguille *on*, de la balance de torsion (fig. 391), il y avait attraction. Touchant la surface interne, Coulomb n'observait aucune trace d'électrisation, d'où il avait conclu qu'il n'y avait d'électricité libre qu'à la surface extérieure de la sphère.

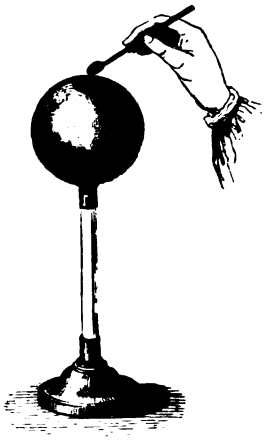


Fig. 392 (h = 68).

Toutefois, cette conséquence ne paraît pas rigoureuse, car M. Bourbouze ayant répété récemment l'expérience ci-dessus, en faisant communiquer les deux faces de la sphère creuse, chacune avec un électromètre à feuilles d'or (584), il a trouvé qu'elles étaient chargées toutes les deux de la même électricité et en quantité égale, ce qui montre que l'électricité ne se porte pas seulement sur la surface externe, mais aussi sur la surface interne. On

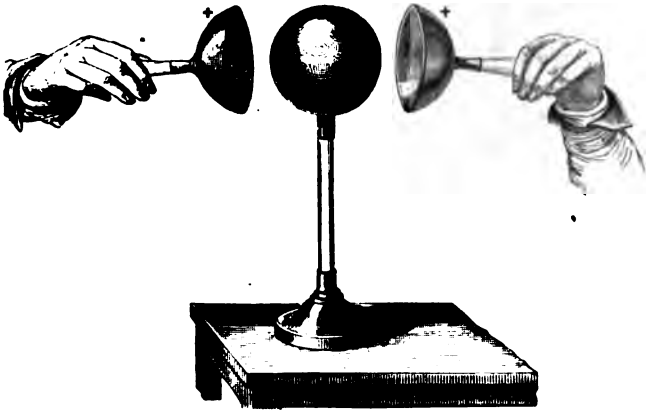


Fig. 393.

a aussi expliqué l'électricité que possède le plan d'épreuve, après voir touché l'intérieur de la sphère, comme provenant du bâton

de gomme laque, dans lequel le fluide neutre serait décomposé par l'influence de l'électricité qui se trouve sur les bords de l'ouverture de la sphère creuse.

2° On a une sphère de cuivre, isolée sur un pied de verre; sur cette sphère s'appliquent deux hémisphères creux, aussi en cuivre, de même diamètre qu'elle, pouvant la recouvrir exactement et

Fig. 394.

s'enlever à volonté à l'aide de manches de verre. Après avoir électrisé la sphère, on applique dessus les deux hémisphères qu'on tient par les manches de verre, puis on les retire brusquement et bien ensemble (fig. 393). Or, on observe qu'ils sont alors électrisés tous les deux, mais que la sphère n'a conservé aucune trace d'électricité. Le fluide communiqué à la sphère était donc tout entier à sa surface, puisqu'il a été complétement enlevé en même temps que ses deux enveloppes.

3° On peut encore constater que l'électricité se porte à la surface des corps, au moyen de l'appareil représenté dans la figure 394.

Il consiste en un cylindre de cuivre isolé, sur lequel s'enroule une feuille métallique très-flexible, qu'on peut enrouler ou dérouler à volonté, en faisant tourner le cylindre à l'aide d'une manivelle. Enfin, sur une boule de métal, en communication avec le cylindre; est un petit électromètre, composé d'un cadran d'ivoire, au centre duquel tourne une tige légère terminée par une petite boule de sureau. Cela posé, en communiquant de l'électricité au cylindre, on voit le petit électromètre diverger en vertu d'une répulsion électrique. Or, si l'on tourne alors le cylindre de manière à dérouler la feuille métallique qui le recouvre, la divergence diminue; en l'enroulant de nouveau, la divergence augmente. On conclut de là que, la quantité totale d'électricité possédée par un corps restant la même, la répulsion exercée par l'électricité, en chaque point de la surface, est d'autant moindre que la surface est plus grande, ce qui montre que l'électricité se porte à la surface.

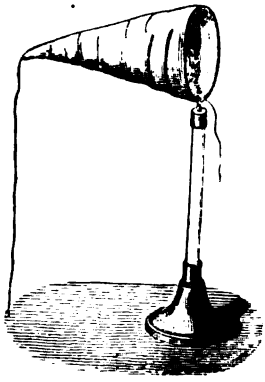


Fig. 395.

4° Une quatrième expérience, due à M. Faraday, consiste à fixer, sur un cercle métallique isolé, une petite poche conique, en mousseline, assez semblable à celles dont on se sert pour prendre des papillons (fig. 395). Au moyen de deux fils de soie, attachés des deux côtés au sommet du cône, on peut le retourner à volonté. Cela posé, on électrise la mousseline en la touchant avec un corps électrisé, et on trouve, à l'aide du plan d'épreuve, que sa surface extérieure est seule électrisée; puis, tirant le fil de soie intérieur, on retourne la poche, de manière que sa surface interne devienne externe et réciproquement; or, on reconnaît alors que c'est encore la surface externe qui est seule électrisée.

5° Enfin, l'expérience montre qu'une sphère de métal massive ne prend pas plus d'électricité qu'une sphère de bois de même diamètre recouverte d'une feuille de métal très-mince.

La propriété qu'a l'électricité de s'accumuler à la surface des corps, est regardée comme une conséquence de la force répulsive que chaque fluide exerce sur lui-même. En effet, en soumettant au calcul l'hypothèse des deux fluides, et en admettant qu'ils s'attirent

mutuellement en raison inverse du carré de la distance et qu'ils repoussent leurs propres molécules suivant la même loi, Poisson est arrivé à la même conséquence que Coulomb sur la distribution de l'électricité dans les corps. On a donc été conduit à considérer l'électricité libre comme accumulée, sous forme d'une couche extrêmement mince, à la surface des corps électrisés, dont elle tend sans cesse à s'échapper, n'étant retenue que par la résistance que lui présente la faible conductibilité de l'air[1].

L'effort que fait ainsi l'électricité pour se dégager des corps se nomme *tension;* on verra bientôt les causes qui la font varier.

575. **Influence de la forme des corps sur l'accumulation de l'électricité.** — Sur une sphère métallique, l'épaisseur de la couche électrique est la même en chaque point de la surface. Il est évident, en effet, qu'il doit en être ainsi d'après la forme symétrique du corps. On le vérifie au moyen du plan d'épreuve et de la balance de torsion (fig. 391). Pour cela, on électrise une sphère isolée pareille à celle que représente la figure 392, et la touchant successivement en différents points, avec le plan d'épreuve, on présente chaque fois celui-ci à l'aiguille de la balance. On observe constamment la même torsion, ce qui fait voir que partout le plan d'épreuve a recueilli la même quantité d'électricité.

1. « Selon M. Faraday, la tendance de l'électricité à se porter à la surface des corps conducteurs est plus apparente que réelle, et les expériences qui constatent qu'il n'y a d'électricité libre qu'à leur surface s'expliquent facilement d'une autre manière. D'après sa théorie, aucune charge électrique ne peut se manifester dans l'intérieur d'un corps à cause des directions opposées des électricités dans chacune des particules intérieures, d'où résulte un effet nul; tandis que l'induction (580) exercée par les corps extérieurs rend sensible l'électricité à la surface. D'après cette manière de voir, l'électricité doit se montrer seulement à la surface d'une enveloppe conductrice, quelle que soit la conductibilité ou la faculté isolante de la substance placée intérieurement. C'est ce que M. Faraday a démontré en électrisant fortement de l'essence de térébenthine placée dans un vase de métal : il n'y avait d'électricité apparente qu'à la surface extérieure du vase. Il a même construit une chambre cubique, d'un mètre de côté, dont les parois en bois étaient recouvertes extérieurement de feuilles de plomb; il l'a isolée, puis après y avoir placé des électroscopes et autres objets, il a électrisé l'air intérieur avec une forte machine. Aucune trace d'électricité ne s'est manifestée au dedans, tandis que des étincelles considérables et des aigrettes lumineuses partaient dans tous les sens de la surface extérieure. Ces expériences, en complétant celles de Coulomb, dans lesquelles il ne s'agissait que de corps conducteurs, rendent peu probable l'explication qu'on en donnait, vu qu'elle était basée sur la libre propagation de l'électricité dans la masse conductrice, d'où résultait que cette électricité se portait toute à la surface. Une fois que le phénomène a lieu de la même manière avec des corps isolants placés intérieurement, cette explication n'est plus soutenable. »

De La Rive, *Traité d'Électricité*, t. I, p. 143.

Si le corps électrisé est un ellipsoïde allongé (fig. 396), l'épaisseur de la couche électrique cesse d'être uniforme; le fluide électrique, obéissant toujours à sa propre répulsion, s'accumule vers les parties les plus aiguës, sur lesquelles l'électricité acquiert ainsi un maximum d'épaisseur. Pour le démontrer, on touche l'ellip-

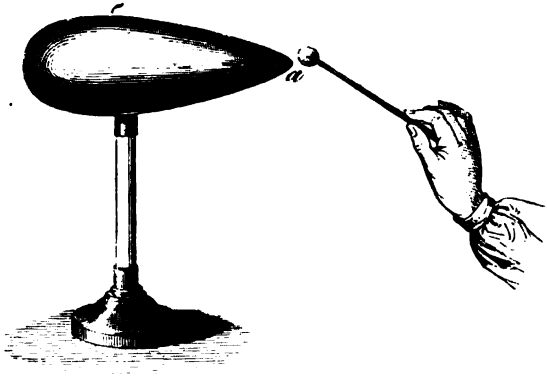


Fig 396. (h = 55).

soïde en différents points, avec le plan d'épreuve, et portant celui-ci dans la balance de Coulomb, on reconnaît que le maximum de torsion se produit lorsqu'on a touché l'extrémité *a* de l'ellipsoïde, et le minimum lorsque le plan d'épreuve a touché la région moyenne *e*. Laplace a trouvé par le calcul que la tension, en chaque point, est proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche électrique.

576. **Pouvoir des pointes.** — On nomme *pouvoir des pointes*, sur les corps conducteurs, la propriété qu'elles possèdent de laisser écouler le fluide électrique. Cette propriété, découverte par Franklin, s'explique par la loi de la distribution de ce fluide à la surface des corps. En effet, l'électricité s'accumulant vers les parties aiguës (575), l'épaisseur électrique croît vers les pointes, et la tension, croissant en même temps, l'emporte bientôt sur la résistance de l'air; c'est alors que le fluide se dégage dans l'atmosphère. Si on approche la main de la pointe, on ressent comme un souffle léger qui semble en sortir, et quand le dégagement d'électricité a lieu dans l'obscurité, on remarque, sur la pointe, une aigrette lumineuse.

577. **Communication et distribution de l'électricité sur les corps en contact.** — Lorsqu'on met en contact deux corps conducteurs, l'un électrisé, l'autre à l'état naturel, il y a partage de l'électricité entre les deux corps dans un rapport qui dépend de celui de leur surface; et lorsqu'on les sépare, l'un a gagné, l'autre a perdu de l'électricité sur tous ses points. S'ils ne sont pas conducteurs, il n'y a perte ou gain que sur les points en contact.

A l'aide du plan d'épreuve et de la balance de torsion, Coulomb a fait de nombreuses expériences sur la distribution de l'électricité à la surface des corps en contact. Avec des sphères métalliques isolées, mises en contact et électrisées dans cet état, il a trouvé que le fluide électrique se distribue diversement sur leurs surfaces, suivant le rapport des diamètres. Ceux-ci étant égaux, l'épaisseur électrique est nulle au point de contact, ne devient sensible qu'à 20 degrés de ce point, croît rapidement de 20 à 30 degrés, plus lentement de 60 à 90, et reste à peu près la même de 90 à 180 degrés.

Lorsque les diamètres sont inégaux, dans le rapport de 2 à 1, l'épaisseur électrique, qui est encore nulle au point de contact, est d'abord plus considérable sur la grande sphère; mais elle augmente ensuite plus rapidement sur la petite, et à 180 degrés du point de contact, c'est sur elle qu'a lieu la plus forte épaisseur.

578. **Déperdition de l'électricité dans l'air.** — Les corps électrisés, quoique isolés, perdent toujours plus ou moins rapidement leur électricité. Cette déperdition résulte de deux causes : 1° la conductibilité de l'air et des vapeurs qui enveloppent les corps; 2° la conductibilité des isoloirs qui leur servent de supports.

La déperdition par l'air varie avec la tension électrique, avec le renouvellement de l'air et avec son état hygrométrique. L'air sec conduit mal l'électricité; mais s'il est humide, il devient conducteur, et l'est d'autant plus qu'il contient plus de vapeur. Coulomb a montré que, *dans un air calme et à un état hygrométrique constant, la déperdition, dans un temps très-court, est proportionnelle à la tension;* loi analogue à celle de Newton sur le refroidissement (344).

Coulomb expérimentait dans un air humide; mais dans des gaz parfaitement desséchés, M. Matteucci a trouvé que la déperdition de l'électricité ne suit plus la loi de Coulomb, et que, dans de certaines limites de tension, la perte est indépendante de la quantité d'électricité et proportionnelle au temps, c'est-à-dire que dans des temps égaux les pertes successives sont égales.

D'après le même physicien, à température et à pression égales, la perte est la même dans l'air, dans l'hydrogène et dans l'acide carbonique, quand ces gaz sont complétement desséchés; avec des corps fortement électrisés, la déperdition est plus grande quand ils sont électrisés négativement que lorsqu'ils le sont positivement; dans les gaz secs, à pression constante, la déperdition augmente avec la température; enfin, toujours dans les gaz secs, la perte est indépendante de la nature du corps électrisé, c'est-à-dire qu'elle est la même, que celui-ci soit conducteur ou isolant.

Quant à la perte par les supports, non-seulement ceux-ci n'isolent jamais complétement, mais Coulomb a trouvé qu'ils sont la source d'une abondante déperdition pour les corps fortement électrisés. Cette déperdition diminue graduellement et devient constante lorsque la tension électrique est très-affaiblie. Elle peut même alors être négligée, si l'on donne aux isoloirs une longueur suffisante; longueur qui, d'après Coulomb, doit augmenter proportionnellement au carré de la tension électrique du corps à isoler. La gomme laque isole alors à peu près complétement; mais le verre, qui est hygrométrique, doit être desséché avec soin.

579. **Déperdition de l'électricité dans le vide.** — L'électricité étant retenue à la surface des corps par la mauvaise conductibilité de l'air, quand celui-ci se raréfie la déperdition augmente, et dans le vide, où la résistance est nulle, toute l'électricité se dissipe. C'est du moins la conséquence à laquelle conduit la théorie mathématique qui rend compte de l'équilibre de l'électricité sur la surface des corps; mais Hawksbee, Gray, M. Harris et M. Becquerel ont montré que, dans le vide, des tensions électriques faibles peuvent être maintenues. M. Becquerel a même observé que dans le vide à un millimètre (466) un corps conservait encore de l'électricité après quinze jours; et il est probable que si un corps électrisé se trouvait dans un vide parfait, loin de toute matière qui pût exercer sur lui une action par influence (580), il conserverait indéfiniment une certaine tension électrique.

CHAPITRE III.

ACTION DES CORPS ÉLECTRISÉS SUR LES CORPS A L'ÉTAT NEUTRE; MACHINES ÉLECTRIQUES.

580. **Électrisation par influence ou par induction.** — Un corps électrisé agit sur un corps à l'état neutre de la même manière qu'un

aimant agit sur le fer doux (540); c'est-à-dire que, décomposant le fluide neutre, il attire l'électricité de nom contraire à celle qu'il possède et repousse celle de même nom. Pour exprimer cet effet, qui est une conséquence de l'action mutuelle des deux électricités, on dit que le corps qui était d'abord à l'état neutre, est maintenant *électrisé par influence* ou *par induction*.

On démontre l'électrisation par influence au moyen d'un cylindre de cuivre jaune, isolé sur un pied de verre, et portant, à ses extré-

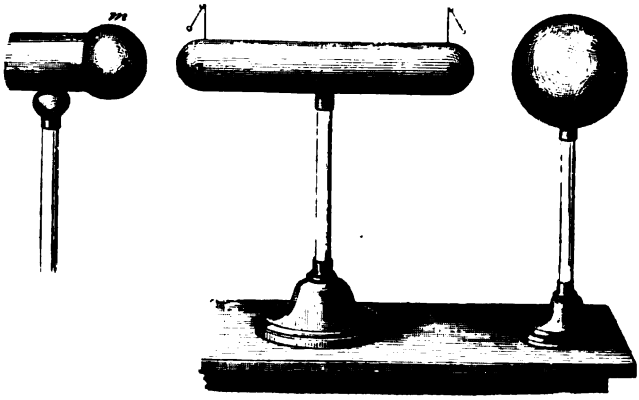


Fig. 397 (h = 54).

mités, deux petits pendules électriques, formés de balles de sureau suspendues par des fils de chanvre qui sont conducteurs (fig. 397). Plaçant ce cylindre à quelques centimètres d'un des conducteurs *m* de la machine électrique, celle-ci, qui, ainsi qu'on le verra bientôt, est chargée de fluide positif, attire le fluide négatif et repousse le fluide positif; en sorte que, les fluides se distribuant alors comme l'indiquent les signes + et — marqués sur le dessin, chaque pendule se trouve repoussé.

Pour reconnaître l'espèce d'électricité dont sont chargées les extrémités du cylindre, on frotte un bâton de cire d'Espagne, et le présentant au pendule le plus rapproché de la machine électrique, on observe une répulsion, ce qui montre que ce pendule est chargé de la même électricité que la résine, c'est-à-dire de fluide négatif. En présentant de même au second pendule un tube de verre frotté, il y a également répulsion, donc ce pendule est électrisé positivement. Par conséquent, un corps électrisé par influence possède à la

fois, sur deux régions opposées, les deux espèces d'électricités à l'état libre. Entre ces parties électrisées en sens contraire se trouve nécessairement une zone à l'état neutre. On le vérifie en disposant plusieurs petits pendules à balle de sureau le long du cylindre : leur divergence décroît rapidement en s'éloignant des extrémités, et devient nulle en un certain point, qui est le *point neutre*. Ce point n'est jamais au milieu du cylindre; sa position dépend de la charge électrique et de la distance du cylindre au corps qui agit sur lui par influence; mais il est toujours plus près de l'extrémité la plus rapprochée de ce corps.

Un corps électrisé par influence agit à son tour sur les corps voisins pour séparer leurs deux fluides, comme le montre la disposition relative des signes + et —, sur la boule qui est représentée à la suite du cylindre.

Tout corps électrisé par influence présente les deux principes suivants : 1° Aussitôt que l'influence cesse, les deux fluides se recomposent, et le corps ne conserve aucune trace d'électricité. Ce principe se vérifie avec le cylindre de la figure 397, car les pendules retombent dès qu'on l'éloigne de la source électrique, ou dès qu'on ramène celle-ci à l'état neutre en la touchant avec le doigt. 2° Lorsqu'un corps conducteur est électrisé par influence, si on le touche, *sur un quelconque de ses points*, soit avec une tige métallique, soit avec le doigt, c'est toujours le fluide de même nom que celui de la source électrique qui s'écoule dans le sol, le fluide de nom contraire étant retenu par l'attraction du fluide de la source; par exemple, dans le cylindre ci-dessus, c'est le fluide négatif qui reste, soit qu'on le touche à l'extrémité positive, à l'extrémité négative, ou au milieu.

C'est par un effet d'électrisation par influence qu'une machine électrique ne peut se charger s'il se trouve, dans son voisinage, une pointe métallique en communication avec le sol; en effet, le fluide positif de la machine agissant par influence sur la pointe, il s'écoule de celle-ci (576) un courant continu de fluide négatif qui neutralise l'électricité de la machine.

* 584. **Théorie de M. Faraday sur l'électrisation par influence.** — La théorie de l'électrisation par influence, telle que nous venons de la faire connaître, est celle admise jusqu'ici par tous les physiciens; mais des travaux récents de M. Faraday, sur la polarité électrique, tendent à la modifier et peut-être à la renverser tout à fait. En effet, jusqu'à présent on n'avait pas tenu compte, dans les phénomènes que nous venons de considérer, du milieu qui sépare le corps électrisé de celui sur lequel il agit par influence. Or, les nouvelles expériences de M Faraday conduisent plutôt à admettre que c'est par l'intermédiaire même de ce milieu que s'opèrent tous les

phénomènes par influence, et non par une action à distance, ou du moins à une distance qui n'excède pas l'intervalle entre deux molécules adjacentes. M. Faraday admet qu'il se produit alors, dans le milieu intermédiaire, une suite de couches moléculaires alternativement négatives et positives, ce qui constitue ce qu'il appelle la *polarisation* de ce milieu. Ce serait donc, dans la nouvelle théorie, à la polarisation des molécules de l'air, ou d'un autre milieu, que serait due l'action que paraissent exercer à distance les corps électrisés sur les corps à l'état neutre, tandis que dans la théorie admise jusqu'ici, l'air ne joue qu'un rôle passif, et ne fait, par sa non-conductibilité, que s'opposer à la recomposition des électricités contraires. En un mot, la théorie nouvelle tend à supprimer l'action à distance pour la remplacer par l'action continue et constante d'un milieu, d'une matière intermédiaire, propre à transmettre l'action d'un corps à un autre[1].

En nommant *pouvoir inducteur* la propriété qu'ont les corps de transmettre au travers de leur masse l'influence électrique, M. Faraday trouve que tous les corps isolants n'ont pas le même pouvoir inducteur. Pour comparer les pouvoirs inducteurs des différentes substances, il a fait usage de l'appareil représenté dans la figure 399, et dont la figure 398 représente une coupe verticale. Cet appareil se compose d'une enveloppe sphérique PQ, formée de deux hémisphères de cuivre jaune, qui se séparent comme les hémisphères de Magdebourg (fig. 77), et comme eux s'appliquent bord à bord, de manière à fermer hermétiquement. Dans l'intérieur de cette enveloppe est une sphère de cuivre jaune C, d'un diamètre moindre que l'enveloppe et communiquant avec une boule extérieure B, au moyen d'une tige métallique, qui est isolée de l'enveloppe PQ par une couche épaisse de gomme laque A. Quant à l'intervalle *mn*, il est destiné à recevoir la substance dont on veut mesurer le pouvoir inducteur. Enfin, le pied de l'appareil porte un canal à robinet, qui peut se visser sur la machine pneumatique lorsqu'on veut retirer l'air compris dans l'espace *mn*, ou le raréfier.

Cela posé, on a deux appareils semblables à celui que nous venons de décrire, identiques entre eux, et ne contenant d'abord, tous les deux, que de l'air dans l'intervalle *mn*; puis les enveloppes PQ communiquant avec le sol, on met la boule B de l'un des appareils en communication avec une source d'électricité. La sphère C se charge alors, à la manière de l'armature intérieure de la bouteille de Leyde, la couche d'air *mn* représentant la lame isolante qui sépare les deux armatures. L'appareil une fois chargé, on mesure la tension de l'électricité restée libre sur la sphère C, en touchant la boule B avec un plan d'épreuve, et en portant celui-ci dans la balance de Coulomb. Dans l'expérience de M. Faraday, ce physicien a obtenu ainsi une torsion de 250°, qui représentait la tension sur la sphère C. Mettant enfin la boule B de l'appareil ainsi chargé en communication avec la boule B du second appareil non encore chargé, on trouve, à l'aide du plan d'épreuve et de la balance de torsion, que la tension sur les deux sphères C est sensiblement 125, c'est-à-dire que l'électricité s'est

1. « La théorie de M. Faraday, dit M. de La Rive, quoique ayant encore besoin d'être étudiée, mérite cependant déjà d'attirer l'attention sérieuse des physiciens. Elle semble reposer sur un principe juste, celui que les actions électriques ne se manifestent jamais que par l'intermédiaire des particules matérielles; elle tend à opérer un rapprochement remarquable entre les forces électriques et les autres forces de la nature. Enfin, des expériences de M. Faraday, il résulte déjà un point important acquis à la science, savoir, le fait de la polarisation moléculaire dans les corps isolants, mode probable de propagation de l'électricité dans les corps conducteurs également. »

Toutefois, on a présenté plusieurs objections à la théorie de M. Faraday, dont une des plus fortes est l'action à distance qui s'exerce, dans le vide, entre les corps électrisés, à moins qu'on n'admette que, même dans le vide le plus parfait qu'on puisse obtenir, il reste encore assez de molécules matérielles pour que la polarisation puisse se produire. En outre, M. Matteucci a fait des recherches récentes sur la propagation de l'électricité dans les corps isolants, qui l'ont conduit à des conclusions différentes de celles de M. Faraday.

distribuée également sur les deux appareils ; ce qu'on pouvait prévoir d'avance, puisqu'ils sont identiques et contiennent tous les deux de l'air dans l'intervalle *mn*.

Cette première expérience faite, on la répète, mais en remplissant préalablement l'intervalle *mn*, dans le second appareil, de la substance dont on veut étudier le pouvoir inducteur, soit de gomme laque. Puis ayant chargé l'autre appareil, celui dans lequel l'intervalle *mn* est toujours rempli d'air, on mesure la tension sur la boule C ;

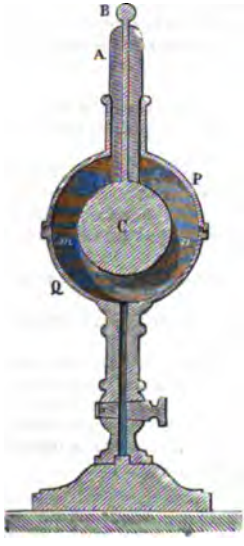


Fig. 398.

Fig. 399.

supposons qu'elle soit 290, nombre trouvé par M. Faraday. Or, si actuellement on fait communiquer la boule B de l'appareil chargé avec la boule B de l'appareil où est la gomme laque, on ne trouve plus, comme ci-dessus, que chaque appareil possède la moitié de 290, ou 145. En effet, l'appareil à air accuse seulement une tension 114, et celui à gomme laque une tension 113. L'appareil à air qui avait 290, et n'a plus que 114, a donc perdu 176 ; par conséquent, on devrait trouver sur l'appareil à gomme laque 176 au lieu de 113. Puisqu'on ne retrouve que 113, cela montre qu'une plus grande quantité d'électricité a été neutralisée au travers de la couche de gomme laque qu'au travers de la couche d'air de même épaisseur dans la première expérience ; d'où l'on conclut que le pouvoir inducteur de la gomme laque est plus grand que celui de l'air.

En opérant comme ci-dessus, on trouve qu'en représentant par 1 le pouvoir inducteur de l'air, les pouvoirs des substances suivantes sont :

Air.....	1....
Flint.....	1,76.

Résine	1,77
Poix	1,80
Cire jaune	1,86
Verre	1,90
Gomme laque	2 ..
Soufre	2,24

En parlant plus tard de l'induction produite par le courant de la pile, nous ferons connaître des expériences de M. Matteucci, d'après lesquelles le développement de l'induction du courant serait indépendant de la nature du corps isolant interposé entre l'inducteur et l'induit, ce qui n'est pas d'accord avec les résultats obtenus ci-dessus par M. Faraday pour l'induction de l'électricité statique.

Quant aux gaz, M. Faraday a trouvé qu'ils ont tous sensiblement le même pouvoir inducteur, et que ce pouvoir n'est modifié ni par la température ni par la pression du gaz.

D'après la capacité inductrice propre que possèdent les corps isolants, M. Faraday a donné à ces corps le nom de *diélectriques*, par opposition aux corps conducteurs qui ne jouissent pas de la même propriété. Le même physicien, qui a fait une étude approfondie du rôle joué par les diélectriques dans l'induction, est arrivé à ces deux résultats :

1° *Qu'il n'y a point induction au travers des corps conducteurs lorsqu'ils sont en communication avec le sol;*

2° *Que l'induction d'un corps sur un autre peut s'exercer en ligne courbe quand, entre les deux corps, est interposé un diélectrique.*

Non-seulement ces principes ne sont point acceptés par tous les physiciens, mais il faut reconnaître que les expériences qui y ont conduit M. Faraday peuvent être interprétées autrement qu'elles ne l'ont été par ce savant; surtout celle qui a pour but de démontrer que l'induction ne peut s'exercer au travers des corps conducteurs. Nous n'entrerons donc pas dans plus de détails à ce sujet, nous bornant à renvoyer le lecteur au *Traité d'Électricité* de M. de La Rive, t. I, p. 129 à 140.

582. **Communication de l'électricité à distance.** — Dans l'expérience représentée dans la figure 397, les électricités contraires du conducteur *m* et du cylindre isolé tendent à se réunir, et elles ne restent maintenues à la surface de ces deux corps que par la résistance de l'air; mais si la résistance diminue, ou si la tension augmente, la force attractive des deux électricités l'emporte sur l'obstacle qui les sépare, et elles se recomposent alors au travers de l'air, en donnant naissance à une étincelle plus ou moins vive accompagnée d'un bruit sec. L'électricité négative du cylindre se trouvant ainsi neutralisée par l'électricité positive que lui a cédée la machine, il ne reste plus, sur le premier, que de l'électricité positive qu'il conserve quoique l'influence vienne à cesser.

Le même phénomène a lieu lorsqu'on présente le doigt à un corps fortement électrisé. Celui-ci décompose par influence l'électricité naturelle de la main, attire avec étincelle le fluide contraire, et repousse dans le sol le fluide de même nom.

Quant à la distance explosive, elle varie selon la tension du fluide électrique, la forme des corps, leur puissance conductrice, et le plus ou moins de résistance des milieux environnants.

Tout ce qui précède s'applique à l'électrisation par influence des corps bons conducteurs : ceux qui sont mauvais conducteurs s'électrisent difficilement par influence ; mais une fois électrisés, l'état électrique persiste assez longtemps après la cause qui l'a produit.

583. **Mouvements des corps électrisés.** — La théorie de l'électrisation par influence donne l'explication des mouvements d'attraction et de répulsion que présentent entre eux les corps électrisés. En effet, étant donnés un corps fixe M (fig. 400), que nous supposerons électrisé positivement, et un corps mobile N, placé à une petite distance du premier, on peut considérer trois cas :

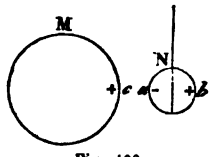


Fig. 400.

1° *Le corps mobile est à l'état naturel et conducteur.* — Dans ce cas, le corps M, agissant par influence sur le fluide neutre du corps N, attire le fluide négatif et repousse le fluide positif, de sorte que le maximum de tension des deux fluides a lieu respectivement aux points *a* et *b*. Or, les attractions et les répulsions électriques s'exerçant en raison inverse du carré de la distance (572), l'attraction entre les points *a* et *c* l'emporte sur la répulsion entre les points *b* et *c*, et le corps mobile s'approche du corps fixe par l'effet d'une résultante égale à l'excès de la force attractive sur la force répulsive.

2° *Le corps mobile est électrisé et conducteur.* — Si le corps mobile est chargé d'une électricité contraire à celle du corps M, il y a toujours attraction ; s'il est chargé de la même électricité, il y a répulsion pour une certaine distance, mais plus près il peut y avoir attraction sans qu'il y ait eu contact. Pour expliquer cette anomalie, il suffit d'observer qu'outre le fluide libre que contient déjà le corps mobile, il contient aussi du fluide naturel, et que celui-ci étant décomposé par l'influence du fluide positif du corps M, l'hémisphère *b* reçoit une nouvelle quantité de fluide positif, pendant que l'hémisphère *a* se charge de fluide négatif : il y a donc, comme dans le cas précédent, attraction et répulsion. La seconde force l'emporte d'abord sur la première, parce que la quantité de fluide positif sur le corps N est plus grande que la quantité de fluide négatif ; mais l'intervalle *ac* diminuant, la force attractive croît plus vite que la force répulsive, et peut finir par l'emporter sur elle.

3° *Le corps mobile est mauvais conducteur.* — Si le corps mobile est mauvais conducteur et électrisé, il est repoussé ou attiré, selon qu'il est ou non chargé de la même électricité que le corps fixe. S'il est à l'état naturel, comme une source d'électricité puissante et dont l'action se prolonge, peut toujours, même dans les corps les plus mauvais conducteurs, décomposer plus ou moins le fluide naturel, celui-ci l'est, en effet, sous l'influence du corps M, si ce dernier est suffisamment électrisé, et alors il y a attraction.

584. **Électroscope à feuilles d'or.** — On nomme *électroscopes* ou *électromètres* de petits appareils qui servent à reconnaître si un corps est électrisé et quelle est la nature de son électricité. Le pendule électrique déjà décrit (564) est un électroscope. On a imaginé plusieurs sortes de ces appareils; nous ne décrirons, pour le moment, que l'électroscope à feuilles d'or, mais bientôt nous ferons connaître un autre appareil de ce genre, beaucoup plus sensible, l'*électromètre condensateur* de Volta (fig. 425).

Fig. 401 (h = 21).

L'*électromètre à feuilles d'or*, ou *électromètre de Bennet*, consiste en un bocal B, de verre (fig. 401), reposant sur un plateau de cuivre, et dont le goulot est fermé par un bouchon recouvert d'un vernis isolant, ainsi que toute la partie supérieure du bocal. Dans le bouchon passe une tige de cuivre terminée extérieurement par une boule C, de même métal, et intérieurement par deux petites feuilles d'or battu *n*, extrêmement légères.

Lorsqu'on approche de cet appareil un corps chargé d'une électricité quelconque, négative, par exemple, comme l'indique le dessin, cette électricité agissant par influence sur le fluide neutre de la boule et de la tige, le fluide positif est attiré dans la boule, et le fluide négatif repoussé vers les feuilles d'or. Celles-ci, se trouvant ainsi chargées de la même électricité, se repoussent, et c'est là ce qui montre que le corps A, présenté à l'appareil, est électrisé.

Si l'on ignore l'espèce d'électricité dont est chargé le corps qu'on a présenté à l'électromètre, il est facile de la reconnaître. Pour cela, tandis que l'instrument est sous l'influence du corps A, on touche la boule C avec le doigt. L'électricité de même nom que celle dont est chargé le corps A est alors repoussée dans le sol, et la boule, ainsi que la tige, restent chargées d'une électricité *contraire* à celle du corps (580). Les feuilles d'or retombent d'abord : mais, retirant le doigt et ensuite le corps A, elles divergent de nouveau. Il reste à constater l'espèce d'électricité que conserve l'appareil. Pour cela, on approche lentement de la boule C un bâton de verre frotté avec de la laine : si la divergence des feuilles d'or augmente, cela indique que l'électricité de l'électroscope est repoussée à la partie inférieure, d'où l'on conclut qu'elle est de même espèce que celle du verre, c'est-à-dire positive. Si la divergence diminue, c'est que l'électricité de l'appareil est attirée par celle du verre ; elle est donc de nom contraire, c'est-à-dire négative.

MACHINES ÉLECTRIQUES.

585. **Électrophore.** — On nomme *machines électriques* des appareils qui servent à obtenir un développement plus ou moins abondant d'électricité statique. La plus simple des machines électriques est l'*électrophore*. Cet appareil, inventé par Volta, se compose d'un gâteau de résine B (fig. 403), coulé sur un plateau de bois, et d'un disque de bois A, recouvert d'une feuille d'étain et muni d'un manche isolant de verre. Pour obtenir de l'électricité au moyen de cet appareil, on commence par sécher le gâteau de résine et le disque de bois en les chauffant doucement, puis on bat la résine fortement avec une peau de chat, ce qui l'électrise négativement. Posant alors le disque de bois recouvert d'étain sur la résine (fig. 402), celle-ci, qui est très-mauvais conducteur, conserve son électricité négative, et, par son influence sur le disque, attire le fluide positif vers la face qui est en contact avec elle, tandis qu'elle repousse sur l'autre le fluide négatif. Touchant donc la feuille d'étain avec le doigt, c'est le fluide négatif qu'on soustrait, et le disque de bois reste électrisé positivement. En effet, si on l'enlève d'une main par le manche de verre, et si on lui présente l'autre main (fig. 403), il jaillit une vive étincelle due à la recomposition du fluide positif du disque avec le fluide négatif de la main.

Dans un air sec, le gâteau de résine de l'électrophore, une fois

électrisé, peut conserver son électricité pendant des mois entiers, et on peut obtenir, pendant tout ce temps, autant d'étincelles qu'on veut, sans battre de nouveau la résine avec la peau de chat, pourvu qu'on ait soin, à chaque fois, de toucher d'abord le disque recouvert d'étain, tandis qu'il est en contact avec la résine, puis une seconde fois, quand on le tient par le manche de verre.

Fig. 402. Fig. 403.

L'électrophore sert, en chimie, pour faire détoner, dans l'eudiomètre, des mélanges gazeux au moyen de l'étincelle électrique (616).

586. **Machine électrique de Ramsden.** — La première machine électrique est due à Otto de Guéricke, le même qui a inventé la machine pneumatique. Elle consistait en une sphère de soufre fixée à un axe qu'on tournait d'une main, tandis que l'autre appuyait sur la sphère et servait de frottoir. Bientôt on substitua à la boule de soufre un cylindre de résine que Hawksbee remplaça par un cylindre de verre; mais la main servait toujours de frottoir. Vers 1740, Winkler, physicien allemand, fit, le premier, usage d'un coussin de crin recouvert de soie comme frottoir. A la même époque, Bose, professeur dans le duché de Wurtemberg, recueillit, sur un tube de fer-blanc isolé, l'électricité dégagée par le frottement. Enfin, en 1766, Ramsden, à Londres, substitua au cylindre de verre un plateau circulaire de verre, frotté par quatre coussins. Dès lors,

fois, sur deux régions opposées, les deux espèces d'électricités à l'état libre. Entre ces parties électrisées en sens contraire se trouve nécessairement une zone à l'état neutre. On le vérifie en disposant plusieurs petits pendules à balle de sureau le long du cylindre : leur divergence décroît rapidement en s'éloignant des extrémités, et devient nulle en un certain point, qui est le *point neutre*. Ce point n'est jamais au milieu du cylindre; sa position dépend de la charge électrique et de la distance du cylindre au corps qui agit sur lui par influence; mais il est toujours plus près de l'extrémité la plus rapprochée de ce corps.

Un corps électrisé par influence agit à son tour sur les corps voisins pour séparer leurs deux fluides, comme le montre la disposition relative des signes + et —, sur la boule qui est représentée à la suite du cylindre.

Tout corps électrisé par influence présente les deux principes suivants : 1° Aussitôt que l'influence cesse, les deux fluides se recomposent, et le corps ne conserve aucune trace d'électricité. Ce principe se vérifie avec le cylindre de la figure 397, car les pendules retombent dès qu'on l'éloigne de la source électrique, ou dès qu'on ramène celle-ci à l'état neutre en la touchant avec le doigt. 2° Lorsqu'un corps conducteur est électrisé par influence, si on le touche, *sur un quelconque de ses points*, soit avec une tige métallique, soit avec le doigt, c'est toujours le fluide de même nom que celui de la source électrique qui s'écoule dans le sol, le fluide de nom contraire étant retenu par l'attraction du fluide de la source; par exemple, dans le cylindre ci-dessus, c'est le fluide négatif qui reste, soit qu'on le touche à l'extrémité positive, à l'extrémité négative, ou au milieu.

C'est par un effet d'électrisation par influence qu'une machine électrique ne peut se charger s'il se trouve, dans son voisinage, une pointe métallique en communication avec le sol; en effet, le fluide positif de la machine agissant par influence sur la pointe, il s'écoule de celle-ci (576) un courant continu de fluide négatif qui neutralise l'électricité de la machine.

* 581. **Théorie de M. Faraday sur l'électrisation par influence.** — La théorie de l'électrisation par influence, telle que nous venons de la faire connaître, est celle admise jusqu'ici par tous les physiciens; mais des travaux récents de M. Faraday, sur la polarité électrique, tendent à la modifier et peut-être à la renverser tout à fait. En effet, jusqu'à présent on n'avait pas tenu compte, dans les phénomènes que nous venons de considérer, du milieu qui sépare le corps électrisé de celui sur lequel il agit par influence. Or, les nouvelles expériences de M Faraday conduisent plutôt à admettre que c'est par l'intermédiaire même de ce milieu que s'opèrent tous les

Cela posé, la théorie de la machine électrique, fondée sur l'électrisation par frottement et par influence, est extrêmement simple. Dans son mouvement de rotation, le plateau de verre s'électrise positivement et les coussins négativement. Or, ceux-ci, communiquant avec le sol par les montants de bois auxquels ils sont fixés, perdent immédiatement leur électricité à mesure qu'elle se produit. Quant à l'électricité positive du plateau, elle agit par influence sur les conducteurs, et attire le fluide négatif qui, se dégageant par les pointes, vient se combiner à l'électricité positive du verre et la neutralise. Les conducteurs, qui perdent ainsi leur électricité négative, restent donc électrisés positivement. Par conséquent, dans la machine électrique, le plateau ne cède rien aux conducteurs; il ne fait, au contraire, qu'en soutirer le fluide négatif provenant de la décomposition du fluide naturel.

La machine une fois chargée, si on en approche la main, on tire une forte étincelle, qui se renouvelle tout le temps qu'on tourne le plateau; car l'étincelle étant le résultat de la combinaison du fluide négatif de la main avec le fluide positif de la machine, celle-ci tend, à chaque étincelle, à revenir à l'état neutre, mais au fur et à mesure l'influence du plateau l'électrise de nouveau.

587. **Soins à donner aux machines électriques, coussins de Steiner.** — Pour donner à une machine électrique toute l'activité dont elle est susceptible, il importe de dessécher avec soin les supports, le plateau et les coussins. Pour cela, on les chauffe doucement, et on les essuie avec un linge chaud.

Les coussins méritent une attention particulière, tant par leur disposition que par leur bon état d'entretien. Ceux qui sont le plus en usage sont en cuir mince, rembourrés de crin et enduits d'*or mussif*, matière pulvérulente qui n'est autre chose que du deutosulfure d'étain, et qui augmente beaucoup le développement de l'électricité, probablement par une décomposition chimique, comme l'indique l'odeur sulfureuse que répandent les coussins pendant le frottement. Cependant, tout en reconnaissant que les substances oxydables, et qui dans les actions chimiques donnent les effets les plus énergiques, sont aussi celles qui dans le frottement dégagent le plus d'électricité, M. Edmond Becquerel admet que l'état moléculaire des corps frottés influe beaucoup sur les résultats obtenus. En effet, il a constaté par l'expérience que les corps en poudre et doux au toucher, comme l'or mussif, le talc, la plombagine, la farine, la fleur de soufre, le charbon de coke, développent beaucoup d'électricité par le frottement. Mais ne serait-ce point

parce que l'état de poudre impalpable, auquel ces corps sont réduits, les rend plus propres à se combiner à l'oxygène de l'air pendant le frottement ?

Depuis peu d'années, M. Steiner, à Francfort-sur-le-Mein, a remis en usage d'anciens frottoirs, qui paraissent dus à van Marum, en 1788, et qui donnent aux machines une tension électrique bien supérieure à celle qu'on obtient avec les coussins de crin. Ces frottoirs, représentés dans la figure 404, consistent en une plaque de bois bien plane et pressée sur le plateau par un double ressort, ou par deux vis de pression qu'on règle à volonté, ce qui est préférable. Cette plaque de bois est recouverte, dans toute son étendue, de quatre morceaux d'une étoffe de laine aussi épaisse que celle des couvertures de lit. Sur le premier morceau est appliquée une feuille d'étain qui se reploie en dessous pour passer entre le premier morceau de laine et le second, puis entre le second et le troisième, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il atteigne la planchette où il est mis en communication avec une feuille de papier doré appliquée derrière la planchette, et communiquant avec le sol à l'aide de feuilles d'étain et de chaînes métalliques fixées aux montants qui portent les coussins.

Cela posé, le tout est recouvert d'une étoffe croisée, en coton, clouée sur le contour de la planchette. Cette étoffe de coton étant enduite légèrement de suif, on la recouvre d'un amalgame d'étain, zinc, bismuth et mercure, amalgame dont M. Steiner n'a pas fait connaître les proportions. Sur l'étoffe de coton est ensuite appliqué un morceau de fort taffetas, cousu au coton en haut et en bas, et aussi latéralement, mais d'un côté seulement; de l'autre, il se prolonge, dans le sens de la rotation du plateau, de 6 centimètres environ, de manière à recouvrir en partie le plateau. Enfin, sur le taffetas est un enduit de suif, puis une couche du même amalgame qui est déjà sur le coton. C'est la couche d'amalgame appliquée sur le taffetas qui frotte contre le plateau et l'électrise positivement, tandis que l'amalgame, s'électrisant négativement, transmet son électricité à l'amalgame du coton, puis à la feuille d'étain et au sol.

M. Steiner a observé que la couleur du taffetas n'est pas sans influence sur le dégagement de l'électricité. C'est le taffetas jaune qui donne le plus d'électricité; puis le vert, le bleu, le rouge et le blanc; ensuite, le brun et le violet, et enfin le noir, qui ne donne rien.

Les frottoirs que nous venons de décrire donnent, surtout par un temps sec, un dégagement d'électricité remarquable. Avec des

machines à plateau de 80 centimètres de diamètre, de fortes étincelles partent constamment des coussins jusqu'aux peignes, en suivant le contour du plateau, ce qui est dû probablement à l'arête vive de celui-ci, et à l'amalgame qui reste adhérent à cette arête. Le seul inconvénient de ces frottoirs, c'est que le taffetas s'encrasse promptement et demande alors à être renouvelé, sinon l'effet est très-affaibli.

Afin d'éviter la déperdition de l'électricité du plateau par l'air, on fixe quelquefois, aux montants de bois, deux quarts de cercle, en taffetas gommé, qui enveloppent le verre sur ses deux faces, l'un de *a* en P, et l'autre dans la partie opposée. Ces taffetas ne sont pas représentés dans notre dessin. On a constaté que c'est la soie jaune, mince et huilée, qui donne les meilleurs effets; il importe que le taffetas ne soit gommé que d'un seul côté, celui qui n'est pas appliqué contre le verre; enfin, il faut encore qu'il y ait contact parfait entre l'étoffe et le plateau de verre.

La machine électrique de Ramsden, disposée comme le montre la figure 404, donne nécessairement de l'électricité positive; mais on peut aussi lui faire donner de l'électricité négative. Pour cela, on isole les quatre pieds de la table sur des supports épais, de verre ou de résine, puis on fait communiquer les conducteurs C avec le sol. Tournant ensuite le plateau, l'électricité positive des conducteurs se perd dans le sol, tandis que l'électricité négative des coussins se répand dans les montants qui soutiennent le plateau et dans la table. Approchant alors la main des montants, et surtout des bandes d'étain O, on en tire des étincelles qui, avec une forte machine, font ressentir une piqûre plus vive que celle que donne l'étincelle ordinaire des conducteurs.

588. **Tension maximum; électromètre à cadran.** — Même lorsqu'on observe toutes les conditions que nous venons de faire connaître, la tension de la machine électrique a une limite qui ne peut être dépassée, quelle que soit la vitesse de rotation du plateau et le temps pendant lequel on le tourne. Cette limite, qui a lieu quand la somme des déperditions est égale à la production, provient de trois causes : 1° la déperdition par l'air et par la vapeur d'eau qu'il renferme, laquelle est proportionnelle à la tension (578); 2° la déperdition par les supports; 3° la recomposition des deux électricités des coussins et du verre.

On a déjà considéré les deux premières causes de déperdition (578); pour se rendre compte de la troisième, il suffit d'observer que la tension électrique croissant avec la vitesse de rotation, il

vient un moment où elle l'emporte sur la résistance que présente la non-conductibilité du verre. A partir de cet instant, une portion des deux électricités développées sur le verre et les coussins se recompose, et la tension devient constante. Par conséquent, elle finit toujours par être indépendante de la vitesse de rotation.

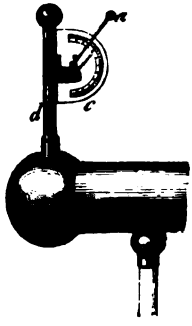


Fig. 405.

La tension de l'électricité sur les machines électriques se mesure avec l'*électromètre à cadran*, ou *électromètre de Henley*. On nomme ainsi un petit pendule électrique consistant en une tige de bois *d* à laquelle est fixé un cadran d'ivoire *c* (fig. 405). Au centre de ce dernier est un petit axe autour duquel tourne une aiguille en baleine terminée par une boule de moelle de sureau *a*. L'instrument étant vissé sur l'un des conducteurs, comme le montre le dessin, à mesure que la machine se charge, l'aiguille diverge et cesse de monter quand le maximum de tension est atteint. Si l'on cesse alors de tourner le plateau, l'aiguille retombe rapidement dans l'air humide; mais dans l'air sec elle ne retombe que lentement, ce qui indique que la déperdition est faible.

589. **Conducteurs secondaires.** — On nomme *conducteurs secondaires* de gros cylindres de cuivre, de fer-blanc, ou de bois recouvert d'étain, qu'on isole à l'aide de pieds de verre ou en les suspendant à des cordons de soie, et qu'on met ensuite en communication avec les conducteurs C de la machine électrique (fig. 404). La surface sur laquelle s'accumule l'électricité se trouvant ainsi augmentée, la tension ne croît pas, mais la quantité d'électricité recueillie augmente, à tension égale, proportionnellement à la surface. En effet, lorsqu'on décharge alors la machine en la faisant communiquer avec le sol, on en tire des étincelles beaucoup plus intenses, et produisant un vif éclat dans l'air.

590. **Machine électrique de Nairne.** — Avec la machine électrique qui vient d'être décrite, on ne peut recueillir que l'électricité positive. Nairne, en Angleterre, a imaginé, dans le but d'électriser les malades, une machine électrique qui porte son nom, et au moyen de laquelle on recueille à la fois les deux électricités. Cette machine, représentée dans la figure 406, se compose de deux conducteurs isolés, ne communiquant pas entre eux. L'un porte un frottoir C,

en cuir rembourré de crin, et l'autre un peigne P, muni de plusieurs pointes. Entre ces deux conducteurs est un manchon de verre M qu'on tourne avec une manivelle, et qui d'un côté touche le frottoir, et de l'autre passe très-près des pointes.

Cela posé, lorsqu'on tourne le manchon de verre, le frottoir C et le conducteur A s'électrisent négativement, et le verre positive-

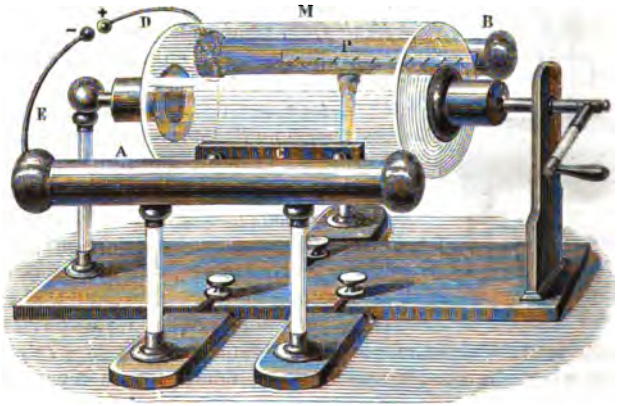


Fig. 406 (h = 70).

ment. Or, celui-ci, en rasant les pointes du conducteur B, décompose son fluide naturel et soutire le fluide négatif, d'où il résulte que ce conducteur reste électrisé positivement. Deux tiges courbes D et E se terminent par deux boules de cuivre assez rapprochées pour qu'il en parte constamment une série d'étincelles provenant de la recomposition des deux électricités des conducteurs.

591. **Machine de van Marum.** — Van Marum a construit une machine électrique à l'aide de laquelle on obtient, à volonté, l'une ou l'autre électricité. Cette machine, représentée dans les figures 407 et 408, se compose d'une roue de verre P, tournant entre quatre coussins *c*, fixés à des boules de cuivre isolées sur des pieds de verre. En avant de la roue est un arc de cuivre *a*, à deux branches, supporté par le pied qui porte l'arbre de la roue, et pouvant être placé verticalement (fig. 407), ou horizontalement (fig. 408). Enfin, de l'autre côté de la roue est une grosse boule de cuivre A, isolée sur un pied de verre, et à laquelle est fixé un arc *d*, pareil au pre-

mier, et pouvant, comme lui, être dirigé horizontalement (fig. 407), ou verticalement (fig. 408).

Cela posé, lorsque les deux arcs *a* et *d* sont disposés comme le montre la figure 407, les deux branches de l'arc *d* touchent les coussins; mais celles de l'arc *a* approchent seulement très-près de la roue de verre sans la toucher. Par conséquent, si, à l'aide de la manivelle M, on fait tourner la roue, les coussins, qui s'électrisent

Fig. 407.

Fig. 408.

négativement, cèdent leur électricité à l'arc *d* et à la boule A, qui se trouve alors chargée d'électricité négative. Quant à l'électricité positive du plateau P, elle agit par influence sur l'arc *a*, et soutire du sol du fluide négatif qui la ramène à l'état neutre.

Au contraire, si les branches *a* et *d* sont disposées comme dans la figure 408, les coussins, communiquant alors avec le sol par l'arc *a*, perdent toute leur électricité, tandis que la roue, qui est électrisée positivement, agissant par influence sur l'arc *d* et sur la boule A, en soutire le fluide négatif, en sorte que, dans ce cas, la boule A reste électrisée positivement.

* 592. **Machine hydro-électrique d'Armstrong.** — La *machine hydro-électrique* est une machine dans laquelle le développement de l'électricité est dû au dégagement de la vapeur d'eau par de petits orifices. Cette machine a été inventée par M. Armstrong, physicien anglais, après la découverte d'un fait nouveau qui fut observé, en 1840, près de Newcastle, sur une chaudière de machine à vapeur. Une fuite s'étant déclarée à la soupape de sûreté, le

chauffeur se trouvait avoir une main près du jet de la vapeur, et allongeait l'autre pour saisir le levier de la soupape, lorsqu'il reçut, au même moment, une forte commotion, et aperçut une vive étincelle entre le levier et sa main.

Informé de ce phénomène, M. Armstrong le reproduisit sur d'autres chaudières, et reconnut que la vapeur dégagée était chargée

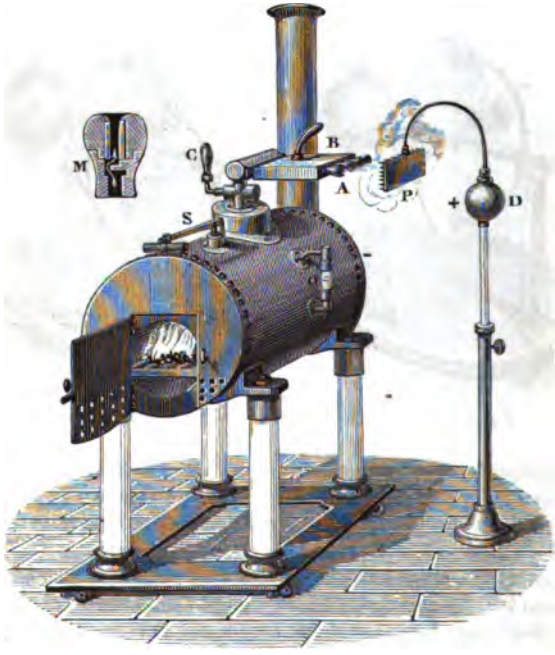


Fig. 409 ($h = 2^m$).

d'électricité positive. En expérimentant sur une locomotive qu'il avait isolée, il observa qu'elle s'électrisait négativement lorsqu'on soutirait par des pointes métalliques, à la vapeur d'eau qui s'échappait dans l'atmosphère, son électricité positive, et il obtint ainsi de très-fortes étincelles. C'est alors qu'il fit construire la machine représentée dans la figure 409.

C'est une chaudière de tôle, à foyer intérieur, isolée sur quatre pieds de verre. Sa longueur est de près de $1^m,50$, et son diamètre

de 0m,60. Un tube de cristal O, placé verticalement sur la droite de la chaudière et communiquant avec elle par les deux bouts, indique le niveau de l'eau dans l'intérieur. Un petit manomètre à air comprimé, qui n'est pas représenté dans le dessin, marque la pression. Sur la chaudière est un robinet C, qu'on ouvre quand la vapeur a acquis une tension suffisante. Au-dessus de ce robinet est une boîte B dans laquelle circulent les tubes par lesquels se dégage la vapeur. Ces tubes sont terminés par des ajutages A d'une forme particulière, représentés, à gauche du dessin, sur une plus grande échelle, par la coupe M. L'intérieur de ces ajutages est de bois dur et contourné comme le montre la flèche, ce qui augmente le frottement. Enfin, la boîte B est remplie d'eau pour refroidir les tubes d'échappement. La vapeur, avant d'atteindre les ajutages de sortie, éprouve ainsi un commencement de condensation, et sort mélangée de vésicules d'eau, condition nécessaire, car, d'après les expériences de M. Faraday, il ne se dégage pas d'électricité par le passage de la vapeur *sèche*.

On avait d'abord attribué le développement de l'électricité, dans la machine hydro-électrique, à la condensation de la vapeur; mais M. Faraday, qui a fait de nombreuses expériences sur cette machine, a trouvé que le développement de l'électricité est uniquement dû au frottement des globules d'eau contre la paroi des ajutages de sortie. En effet, les autres conditions restant les mêmes, si l'on change les petits cylindres de bois qui garnissent l'intérieur des tubes A, l'espèce d'électricité que prend la chaudière est changée; une garniture d'ivoire ne donne aucune trace d'électricité. La même chose a lieu si l'on introduit une matière grasse quelconque dans la chaudière, et les garnitures employées dans ce cas sont mises hors de service. Toutefois, il n'y a dégagement d'électricité que lorsque l'eau est pure, et alors la chaudière est électrisée négativement et la vapeur positivement. Si l'on ajoute de l'essence de térébenthine, l'effet est inverse, c'est-à-dire que la vapeur s'électrise négativement et la chaudière positivement. L'introduction d'une dissolution saline ou d'un acide fait cesser aussitôt tout dégagement d'électricité. M. Faraday a encore observé des effets semblables avec un courant d'air humide; mais avec l'air sec, il n'y a aucun effet.

EXPÉRIENCES DIVERSES AVEC LA MACHINE ÉLECTRIQUE.

593. **Étincelle, tabouret électrique.** — Un des premiers phénomènes qu'on observe lorsqu'on expérimente avec une machine élec-

trique, est la vive étincelle qu'on tire des conducteurs en approchant la main. On a déjà vu (582) que la cause de ce phénomène est l'action par influence qu'exerce le fluide positif de la machine sur le fluide neutre de la main. Celui-ci étant décomposé, l'attraction entre le fluide positif de la machine et le fluide négatif de la main finit par l'emporter sur la résistance de l'air, et, à ce moment, les deux fluides se recomposent avec bruit et lumière; l'étincelle apparaît vive, instantanée, en zigzag, comme l'éclair qui précède le bruit de la foudre. Cette étincelle est accompagnée d'une piqûre assez vive, surtout avec les machines puissantes.

L'étincelle électrique se présente sous un aspect remarquable, et qui étonne ceux qui voient cette expérience pour la première fois, lorsque c'est du corps humain qu'on la fait jaillir. Pour cela, on place la personne qu'il s'agit d'électriser sur un tabouret à pieds de verre qu'on nomme *tabouret électrique;* et cette personne ainsi isolée pose une main sur l'un des conducteurs de la machine électrique. Le corps humain étant bon conducteur de l'électricité, à mesure que la machine se charge, le fluide se distribue sur le corps de la personne isolée, en même temps que sur les conducteurs; en sorte que si l'on touche cette personne sur les mains, sur la figure ou sur les vêtements, on en tire des étincelles comme de la machine même. Tant qu'on n'approche pas la main de la personne isolée, elle n'éprouve aucune commotion, quoique fortement électrisée; seulement ses cheveux se hérissent et se dirigent vers les corps qu'on leur présente, et elle ressent comme un léger souffle sur les mains et sur la figure.

On peut encore électriser une personne isolée sur le tabouret à pied de verre en la battant avec une peau de chat; elle attire alors le pendule électrique et donne des étincelles à l'approche de la main. Si la personne qui tient la peau de chat monte elle-même sur un second tabouret isolant, les deux expérimentateurs sont électrisés, l'un positivement, l'autre négativement.

C'est Dufay, physicien français, qui, le premier, en 1734, tira une étincelle du corps humain.

594. **Carillon électrique, appareil pour la grêle.** — Le *carillon électrique* est un petit appareil qui se compose de trois timbres suspendus à une tringle horizontale en communication avec la machine électrique (fig. 410). Les timbres A et B pendent par des chaînes métalliques qui établissent la communication avec la tringle, tandis que le timbre du milieu pend par un fil de soie qui l'isole de la machine, mais il communique avec le sol au moyen d'une

chaîne métallique. Enfin, entre le timbre du milieu et les deux autres sont deux petites boules de cuivre suspendues à des fils de soie. Cela posé, lorsqu'on charge la machine, les timbres A et B s'électrisant positivement, attirent les boules de cuivre et les repoussent dès qu'il y a eu contact. Or, celles-ci se trouvant alors électrisées positivement, elles se portent vers le timbre C, qui, quoique en communication avec le sol, est chargé d'électricité négative par l'effet de l'influence des deux autres. Aussitôt après le contact, les boules sont donc repoussées vers les timbres A et B, et exécutent ainsi un mouvement de va-et-vient rapide et des chocs successifs qui font résonner les trois timbres tout le temps que la machine est chargée.

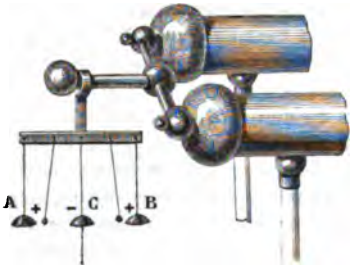


Fig. 410.

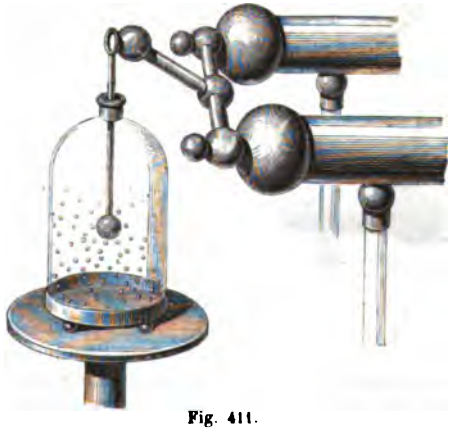


Fig. 411.

Pour expliquer comment les grêlons peuvent souvent atteindre un volume très-considérable avant de tomber, Volta a imaginé un appareil fondé, comme le précédent, sur les attractions et les répulsions électriques. Cet appareil consiste en une cloche de verre placée sur un plateau de cuivre dans lequel on met de petites

balles de moelle de sureau (fig. 411). Dans le goulot de la cloche passe, à frottement doux, une tige de cuivre, terminée à la partie inférieure par une boule de même métal, et communiquant par son extrémité supérieure avec la machine électrique. Aussitôt que celle-ci se charge, la boule qui est dans l'appareil s'électrise, attire les balles de sureau et les repousse ensuite, en sorte qu'elles s'agitent avec une grande vitesse, allant du plateau à la boule et de la boule au plateau, et cédant à ce dernier l'électricité qu'elles ont prise à la boule. Se fondant sur cette expérience, Volta admettait que lorsque les grêlons se trouvent placés entre deux nuages chargés d'électricités contraires, ils vont ainsi successivement de l'un à l'autre, et condensent alors, à leur surface, la vapeur d'eau ambiante, qui, en se congelant, leur fait acquérir le volume qu'on observe quelquefois; mais cette théorie, qui est insuffisante pour rendre compte de la grosseur des grêlons, n'est point admise aujourd'hui.

595. **Tourniquet électrique, insufflation.** — On nomme *tourniquet électrique* un petit appareil composé de cinq ou six rayons métalliques recourbés tous dans le même sens, terminés en pointe et fixés à une chape commune, mobile sur un pivot (fig. 412). Cet appareil étant posé sur la machine électrique, aussitôt que celle-ci se charge, les rayons et la chape prennent un mouvement de rotation rapide dans la direction opposée aux pointes. Ce mouvement n'est point un effet de réaction comparable à celui du tourniquet hydraulique (85), comme l'ont admis plusieurs physiciens : c'est un effet de répulsion entre l'électricité des pointes et celle qu'elles communiquent à l'air. Le fluide électrique s'accumulant vers les pointes, s'écoule dans l'air, et comme celui-ci se trouve chargé de la même électricité que les pointes, il les repousse en même temps qu'il en est repoussé lui-même. On reconnaît, en effet, que le tourniquet n'entre point en mouvement dans le vide, et si l'on approche la main tandis qu'il tourne dans l'air, on ressent un souffle léger dû au déplacement que prend l'air électrisé.

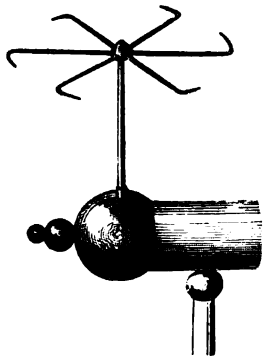


Fig. 412.

Quand l'électricité s'écoule ainsi par une pointe, l'air électrisé est assez fortement repoussé pour donner naissance à un courant qui non-seulement est sensible à la main, mais souffle et peut même éteindre la flamme d'une bougie, du moins avec une puissante machine électrique. La figure 413 montre comment se dispose

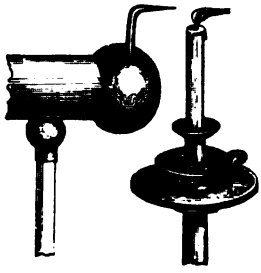


Fig. 413.

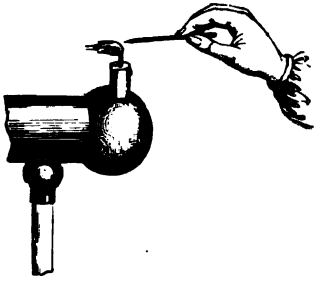


Fig. 414.

cette expérience. On obtient encore le même effet en posant la bougie sur l'un des conducteurs et en lui présentant une pointe métallique qu'on tient à la main (fig. 414). Le courant provient, dans ce dernier cas, du fluide contraire qui se dégage de la pointe par l'influence de la machine.

CHAPITRE IV

CONDENSATION DE L'ÉLECTRICITÉ.

596. **Condensateurs, leur théorie.** — On donne le nom général de *condensateurs* à des appareils qui servent à accumuler, sur des surfaces relativement petites, des quantités considerable d'électricité. On en a construit de diverses sortes, tous fondés sur le principe de l'électrisation par influence (580), et se composant essentiellement de deux corps conducteurs séparés par un corps non conducteur. Nous décrirons d'abord le *condensateur d'Æpinus.*

Cet appareil est formé de deux plateaux circulaires de cuivre A et C, et d'une lame de verre B, qui les sépare (fig. 416). Ces plateaux, munis chacun d'un petit pendule électrique *a* et *b*, sont isolés sur des pieds de verre qui peuvent glisser dans une rainure,

sur une planchette de bois qui porte tout l'appareil. On peut ainsi approcher ou éloigner les plateaux à volonté.

Pour accumuler les deux électricités sur les plateaux de cuivre, on les met en contact avec la lame de verre, comme le représente la figure 415; puis, au moyen de cordons métalliques, on fait communiquer l'un d'eux, A, par exemple, avec la machine électrique, et l'autre avec le sol. Le disque A s'électrise alors positivement,

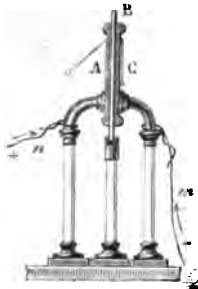


Fig. 415.

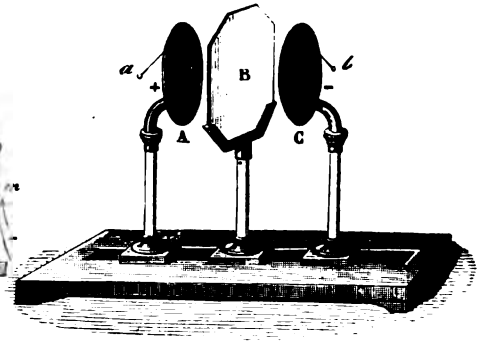


Fig. 416 (h = 51)

comme la machine, et, s'il était seul, il prendrait, à surface égale, la même quantité d'électricité, sauf l'influence de la forme; mais la présence du disque C change complétement le phénomène, et c'est lui qui est cause de l'accumulation des deux électricités. En effet, le fluide positif du disque A agissant par influence, au travers du verre, sur le plateau C, attire le fluide négatif et repousse dans le sol le fluide positif. Or, le fluide négatif du disque C réagit à son tour sur le fluide positif du disque A et le neutralise, mais en partie seulement, vu l'intervalle qui les sépare. La tension électrique, sur le disque A, ne fait donc plus équilibre à la tension de la machine, d'où il résulte que celle-ci fournit à ce plateau une nouvelle quantité de fluide positif, lequel agit comme la première fois sur le disque C, et ainsi de suite; en sorte qu'il s'accumule, sur les deux plateaux, des quantités considérables d'électricités contraires, toutefois jusqu'à une limite déterminée, comme on le verra ci-après.

Le condensateur une fois chargé, si l'on interrompt les communications avec le sol et avec la machine électrique, en retirant les

cordons métalliques *m* et *n* (fig. 415), on remarque que le pendule A diverge seul, tandis que le pendule C reste vertical. La divergence du premier pendule s'explique par l'excès d'électricité du plateau A. Pour expliquer la non-répulsion du pendule C, on admet en général que l'électricité négative du plateau C est entièrement neutralisée, à distance, par l'électricité positive du plateau A; ce qu'on exprime en disant que, sur le plateau C, l'électricité est *dissimulée*, qu'elle est à l'*état latent*. Toutefois, on ne doit pas entendre par là que l'électricité ait rien perdu de ses propriétés ordinaires, mais seulement que les effets de chaque fluide sont contre-balancés, à distance, par ceux du fluide contraire.

Du reste, on commence à abandonner ces dénominations d'*électricité dissimulée*, d'*électricité latente*, parce qu'en effet la dissimulation de l'électricité est plutôt apparente que réelle, comme on peut le voir dans la théorie suivante.

* 597. **Autre théorie des condensateurs.** — Considérons encore le condensateur d'Æpinus (fig. 416), et convenons d'appeler, sur les deux plateaux, faces *antérieures* celles qui regardent la lame de verre B, et faces *postérieures* celles qui lui sont opposées. De plus, supposons d'abord le plateau C assez éloigné du plateau A pour n'en recevoir aucune influence.

Cela posé, si l'on fait communiquer le plateau A avec la machine électrique, il prend une charge maximum qui se distribue également sur ses deux faces, et le pendule *a* diverge fortement. Supprimant la communication, rien n'est changé; mais qu'on approche lentement le plateau C, que nous supposerons d'abord isolé du sol, son fluide neutre étant décomposé par l'influence de A, l'électricité négative se porte sur la face antérieure, et la positive sur la face postérieure, et on voit, en effet, le pendule *b* diverger. Or, l'électricité négative du plateau C agissant à son tour par attraction sur l'électricité positive du plateau A, le fluide de celui-ci cesse d'être également distribué sur ses deux faces et s'accumule en grande partie sur celle qui regarde l'autre plateau, et, en effet, le pendule *a* commence à s'abaisser.

Si actuellement on fait communiquer avec le sol le plateau C, toute son électricité positive s'écoule, et il ne contient plus que du fluide négatif; mais, en même temps, il se produit, sur ce plateau, une nouvelle décomposition de fluide neutre, laquelle fournit à la face anterieure une plus grande quantité de fluide négatif. Par suite, l'électricité positive passe de nouveau de la face postérieure

du plateau A sur sa face antérieure, ce qu'indique le pendule *a* en s'abaissant davantage.

La face postérieure du plateau A étant ainsi presque revenue à l'état neutre, on conçoit que si on la met de nouveau en communication avec la machine électrique, elle prendra une seconde charge d'électricité positive, laquelle se partage encore en deux parties : l'une qui se condense sur la face antérieure du plateau, l'autre qui reste sur sa face postérieure et fait augmenter la divergence du pendule *a*. Le fluide qui s'accumule ainsi sur les deux faces augmentant progressivement, ce pendule finit par atteindre la même divergence que lorsque le plateau A a d'abord été chargé sans être soumis à l'influence du plateau C. A ce moment, l'équilibre s'établissant entre la tension de l'électricité sur la face postérieure du plateau et sur la machine électrique, la limite de charge est atteinte.

Dans cette manière d'envisager la théorie des condensateurs, on voit que sans avoir recours à l'hypothèse de l'électricité dissimulée, la condensation électrique s'explique très-bien par l'accumulation des fluides sur la face antérieure du plateau collecteur, accumulation qui permet à une nouvelle charge électrique de se porter sur sa face postérieure.

598. **Limite de charge des condensateurs.** — La quantité d'électricité qui peut s'accumuler sur chaque face du condensateur est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à la tension de la source et à la surface des plateaux, mais elle décroît quand l'épaisseur de la lame isolante augmente. Dans tous les cas, deux causes limitent la quantité d'électricité qui peut s'accumuler sur les faces du condensateur. La première, c'est que, comme on l'a vu ci-dessus, la quantité d'électricité libre sur le plateau collecteur croissant graduellement, la tension sur ce plateau finit nécessairement par égaler la tension sur la machine, et, à partir de ce moment, celle-ci ne peut rien céder au condensateur.

La deuxième cause est la résistance limitée que présente à la recombinaison des deux électricités la lame isolante placée entre les deux plateaux; en effet, lorsque la tension des deux fluides pour se recombiner l'emporte sur la résistance de cette lame, elle est trouée, et les fluides contraires se réunissent.

* 599. **Calcul de la force condensante.** — On nomme *force condensante* le rapport entre la charge totale que prend le plateau collecteur quand il est influencé par le second plateau, à celle qu'il recevrait s'il était seul; ou, ce qui revient au

même, le rapport entre la quantité totale d'électricité du plateau collecteur, à celle qui s'y trouve libre ; car on admet que l'électricité qui reste libre sur le plateau collecteur est précisément celle qu'il prend étant seul.

Cela posé, pour calculer la force condensante, soient P la quantité totale d'électricité positive sur le plateau collecteur, N la quantité totale d'électricité négative sur le second plateau, et α l'électricité libre sur le premier,

$$\text{on a} \qquad N = mP \quad [1]$$

m étant une fraction dont la valeur est d'autant plus voisine de l'unité que la lame isolante entre les deux plateaux est plus mince. Or, si l'on touche le plateau collecteur, on lui enlève son électricité libre α. Les rôles sont donc changés; c'est le second plateau dont la charge est actuellement la plus grande, mais dans un rapport encore égal à m, la lame isolante étant la même ; c'est-à-dire qu'on a

$$P - \alpha = mN \quad [2], \qquad \text{ou } P - \alpha = m^2P \quad [3],$$

en remplaçant N par sa valeur donnée par l'égalité [1]. De l'égalité [3], on tire

$$\frac{P}{\alpha} = \frac{1}{1 - m^2}$$

rapport qui n'est autre chose que la force condensante cherchée. Quant à la valeur de m, elle se détermine par l'expérience à l'aide du plan d'épreuve et de la balance de torsion.

600. **Décharge lente et décharge instantanée.** — Lorsque le condensateur est chargé, c'est-à-dire lorsque les électricités contraires sont accumulées sur les deux faces, on rompt les communications avec la machine électrique et avec le sol, en enlevant les deux chaînes métalliques. Or, d'après ce qui a été dit plus haut, une partie seulement de l'électricité du plateau A est alors neutralisée, tandis que celle du disque C l'est complétement. En effet, le pendule A diverge seul (fig. 415), tandis que le pendule C est vertical. Mais si l'on éloigne les plateaux (fig. 416), alors les deux pendules divergent, car les électricités ne se neutralisent plus.

Les plateaux étant en contact avec la lame isolante (fig. 415), et les chaînes enlevées, on peut décharger le condensateur, c'est-à-dire le ramener à l'état neutre de deux manières : par une décharge lente, ou par une décharge instantanée. Pour le décharger lentement, on touche, avec le doigt, d'abord le plateau A, c'est-à-dire celui qui contient un excès d'électricité; tout le fluide positif qui n'est pas retenu par le fluide négatif du plateau C s'écoule alors dans le sol, et comme le plateau C ne neutralise qu'une quantité d'électricité moindre que la sienne, c'est lui qui, après ce premier contact, possède la plus forte charge; on voit, en effet, le pendule A retomber et le pendule C diverger. Si actuellement on touche le plateau C, son pendule retombe, tandis que le pendule A diverge, et ainsi de suite, en continuant à toucher alter-

nativement les deux plateaux. La décharge ne s'opère ainsi que fort lentement, et si l'air est sec, elle n'est complète qu'au bout de plusieurs heures. Si l'on touchait d'abord le plateau C, qui est le moins électrisé, on ne lui enlèverait point d'électricité, puisque toute celle qu'il possède est neutralisée par celle du plateau A.

Lorsqu'on veut décharger instantanément le condensateur, on met en communication les deux plateaux au moyen de l'*excitateur*. On nomme ainsi un système de deux arcs de laiton terminés par des boules de même métal et réunis par une charnière. Quand ces arcs sont munis de manches isolants de verre, comme le montre la figure 417, l'appareil se désigne sous le nom d'*excitateur à manches de verre;* si les arcs n'ont pas de manches (fig. 420), on lui donne le nom d'*excitateur simple*. Pour faire usage de l'excitateur, on applique une de ses boules sur un des plateaux du condensateur, et on approche l'autre du second plateau : il jaillit alors une forte étincelle qui provient de la recomposition des électricités contraires accumulées sur les deux faces du condensateur. Toutefois, la recomposition n'est pas complète, car on peut encore tirer, de la même manière, une deuxième, une troisième étincelle, et même davantage, mais de plus en plus faibles. On conclut de là que lorsque les deux plateaux communiquent entre eux, les deux électricités ne peuvent se réunir en totalité. On verra bientôt (603) que ce phénomène provient de ce que les deux fluides accumulés, agissant par influence sur la lame de verre du condensateur, viennent adhérer, en vertu d'une attraction réciproque, aux deux faces de cette lame.

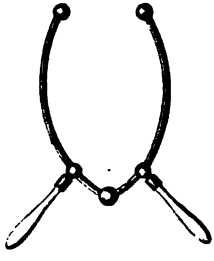


Fig. 417 (h = 41).

Quand on décharge le condensateur avec l'excitateur, même simple, quoiqu'on tienne celui-ci à la main, on ne ressent aucune commotion. Cela tient à ce que de deux conducteurs le fluide électrique choisissant toujours le meilleur, la recomposition des deux électricités s'opère par l'arc métallique, et non par le corps de l'expérimentateur. Mais si, touchant d'une main une des faces du condensateur, on approche l'autre main de la seconde face, la recomposition s'opère par les bras et par le corps, et on ressent une commotion d'autant plus vive que la surface du condensateur est plus grande et la charge électrique plus forte.

604. **Carreau fulminant.** — Le *carreau fulminant* est un condensateur plus simple que celui d'Æpinus, et plus propre à donner de vives étincelles et de fortes commotions. Il est formé d'un carreau de verre ordinaire entouré d'un cadre de bois. Sur les deux faces de ce carreau sont collées deux feuilles d'étain, en regard l'une de l'autre, et laissant entre leurs bords et le cadre un inter-

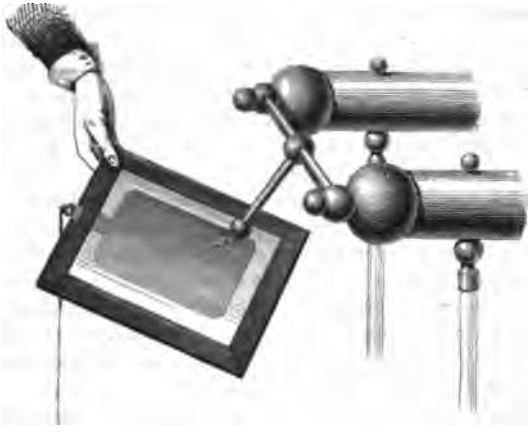


Fig. 418 (1 = 42).

valle de six centimètres environ. Les deux feuilles d'étain ne communiquent pas entre elles, mais l'une d'elles communique avec le cadre par un petit ruban d'étain qui se replie (fig. 418) de manière à être en contact avec un anneau auquel est suspendue une chaîne. Pour charger le carreau fulminant, on présente à la machine électrique la feuille d'étain isolée, c'est-à-dire celle qui ne communique pas au cadre de bois. Comme l'autre feuille est mise, par la chaîne, en communication avec le sol, les deux feuilles se comportent absolument comme les plateaux du condensateur d'Æpinus, et il s'accumule, sur l'une et sur l'autre, une grande quantité d'électricités contraires.

Le carreau fulminant se décharge, comme le condensateur (600), avec l'excitateur simple. Pour cela, tenant le carreau à la main, on applique une des boules de l'excitateur sur l'extrémité de la petite bande d'étain qui appartient à la feuille inférieure, puis, courbant l'excitateur, on approche l'autre boule de la feuille supé-

rieure. Il jaillit alors une vive et bruyante étincelle, due à la recomposition des deux électricités, mais sans que l'expérimentateur ressente la moindre commotion, car la recomposition s'opère tout entière par l'arc métallique. Si, au contraire, tenant toujours l'appareil de la même manière, on touche d'abord la feuille isolée, on reçoit une forte commotion, la recomposition électrique s'opérant par les bras, par le corps et par le sol.

602. **Bouteille de Leyde.** — La *bouteille de Leyde*, ainsi appelée du nom de la ville où elle fut inventée, est due au Hollandais Musschenbroek (les uns disent à Cuneus, son élève), qui la découvrit par hasard, en 1746. Ayant fixé une tige métallique dans le bouchon d'une bouteille remplie d'eau, il la présenta à la machine électrique dans l'intention d'électriser le liquide. Or, la main qui tenait la bouteille faisant l'office de l'un des plateaux du condensateur, tandis que l'eau qui était dans l'intérieur représentait l'autre, il s'accumula, sur la paroi intérieure, du fluide positif, et sur la portion de la paroi extérieure en contact avec la main, du fluide négatif. En effet, ayant approché une main de la tige métallique, tandis que de l'autre il tenait toujours la bouteille, Musschenbroek reçut, dans les bras et dans la poitrine, une commotion tellement forte qu'il écrivait à Réaumur, peu de temps après, qu'il ne recommencerait pas pour le royaume de France.

Cependant, cette expérience une fois connue, on s'empressa de toutes parts de la répéter. L'abbé Nollet, professeur de physique à Paris, remplaça, le premier, l'eau qui était dans la bouteille par des feuilles chiffonnées d'étain, de cuivre, d'argent ou d'or. Déjà un physicien anglais avait reconnu qu'en recouvrant l'extérieur de la bouteille d'une feuille d'étain, les commotions étaient beaucoup plus vives. La bouteille de Leyde prit donc peu à peu la forme qu'on lui donne aujourd'hui, mais on en ignorait encore la théorie; c'est Franklin qui la fit connaître, le premier, en faisant voir que la bouteille de Leyde est, ainsi que le carreau fulminant, un véritable condensateur.

Représentée dans la figure 419, au moment où on la charge, la bouteille de Leyde se compose d'un flacon de verre mince dont la grandeur varie suivant la quantité d'électricité qu'on veut accumuler. L'intérieur est rempli de feuilles de cuivre ou d'or battu. Sur la paroi extérieure est collée une feuille d'étain B qui recouvre aussi le fond, mais qui doit laisser le verre à nu jusqu'à une assez grande distance du goulot. On adapte au col un bouchon de liége dans lequel passe, à frottement dur, une tige de cuivre recourbée

en forme de crochet et terminée par un bouton A; à l'intérieur, cette tige communique avec les feuilles d'or ou de cuivre qui remplissent la bouteille; ces feuilles se désignent sous le nom d'*armature intérieure*, et la feuille d'étain B sous celui d'*armature extérieure*.

La bouteille de Leyde se charge, comme le condensateur d'Æpinus et le carreau fulminant, en faisant communiquer l'une des arma-

Fig. 419 (h = 25).

tures avec le sol, et l'autre avec une source électrique; pour cela, on la tient à la main par l'armature extérieure, et on présente l'armature intérieure à la machine électrique : le fluide positif s'accumule alors sur les feuilles d'or, et le fluide négatif sur l'étain. C'est le contraire qui aurait lieu si, tenant la bouteille par le crochet, on présentait l'armature extérieure à la machine. Du reste, la théorie de la bouteille de Leyde est identiquement la même que celle qui a été donnée pour le condensateur, et tout ce qui a été dit de celui-ci (596) s'applique à la bouteille, en substituant ses deux armatures aux plateaux A et C de la figure 415.

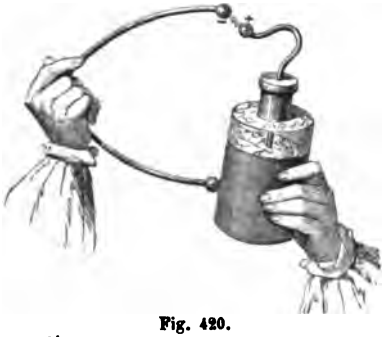


Fig. 420.

Comme le condensateur, elle se décharge lentement ou instantanément. Pour la décharger instantanément, on la tient à la main, comme le représente la figure 420, et on met en communication

les deux armures à l'aide de l'excitateur simple, en ayant soin de toucher *d'abord* l'armature qu'on tient à la main, sinon on reçoit la commotion. Pour la décharger lentement, on l'isole sur un gâteau de résine, et on touche alternativement, avec la main ou avec une tige de métal, l'armature intérieure, puis l'armature extérieure, et ainsi de suite, tirant à chaque contact une étincelle faible.

Fig. 421.

Pour rendre plus sensible la décharge lente, on dispose la bouteille de Leyde comme le représente la figure 421. La tige est droite et munie d'un petit timbre ; près de la bouteille est une tige métallique portant un second timbre semblable au premier, et un petit pendule électrique formé d'une boule de cuivre suspendue à un fil de soie. Cela posé, la bouteille n'étant point fixée à la planchette *m*, on la prend à la main par l'armature extérieure, et on la charge en la présentant à la machine électrique, puis on la remet sur la planchette. L'armature intérieure contenant alors un excès d'électricité positive non neutralisée, le pendule est attiré et vient heurter le timbre de la bouteille; repoussé aussitôt, il va choquer le second timbre et lui cède son électricité; mais, revenu à l'état neutre, il est attiré de nouveau par le premier timbre, et ainsi de suite pendant plusieurs heures, si l'air est sec et la bouteille un peu grande.

603. **Bouteille à armatures mobiles.** — La *bouteille à armatures mobiles* sert à démontrer que dans la bouteille de Leyde et dans tous les condensateurs, en général, ce n'est pas uniquement sur les armatures que résident les deux électricités contraires, mais principalement sur les faces du verre qui les sépare. Cette bouteille, dont les différentes pièces peuvent se séparer, se compose d'un grand vase conique de verre B (fig. 422), d'une armature extérieure C de fer-blanc, et d'une armature intérieure D de même matière. Ces pièces, placées les unes dans les autres, comme le montre la figure A, constituent une bouteille de Leyde complète. Après l'avoir électrisée comme la bouteille ordinaire et isolée sur un gâteau de résine (fig. A), on enlève avec la main l'armature

intérieure, ensuite le vase de verre, puis enfin l'armature extérieure, et on dispose toutes ces pièces les unes à côté des autres, comme le représente le dessin ci-dessous. Or, les deux armatures se trouvent évidemment ramenées ainsi à l'état naturel. Cependant, si remettant l'armature C sur le gâteau de résine, on place dedans le vase de verre, et dans celui-ci l'armure D, on reconstitue une bouteille de Leyde qui donne une étincelle presque aussi forte que

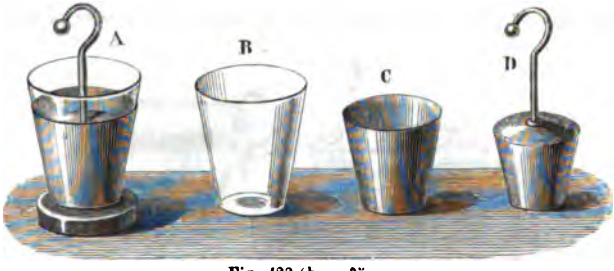


Fig. 422 (h = 35)

si l'on n'avait pas déchargé les deux armatures. On conclut de là que les deux électricités, obéissant à leur attraction réciproque, abandonnent en grande partie les deux armatures pour se porter sur les deux faces du verre.

604. **Charge par cascade.** — On nomme *charge par cascade* la charge électrique qui se transmet successivement d'une bouteille de Leyde à une autre, lorsqu'elles sont disposées dans l'ordre suivant, les unes au-dessous des autres : la première est suspendue par son crochet au conducteur de la machine électrique, puis le crochet d'une seconde bouteille passe dans un nœud en fil métallique fixé à l'armature extérieure de la première, une troisième s'adapte de la même manière à la seconde, et ainsi de suite, au nombre de cinq ou six, l'armature extérieure de la dernière communiquant au sol par un fil métallique. D'après cette disposition, aussitôt que la première bouteille se charge, elle réagit sur le fluide neutre de la seconde et le décompose, puis celle-ci réagit de même sur le fluide neutre de la troisième, et ainsi de suite : de sorte que toutes ces bouteilles prennent, sur leurs armatures intérieures, le même fluide que la machine, et sur leurs armatures extérieures le fluide contraire. Ces bouteilles une fois chargées, on peut les décharger successivement, de l'une à l'autre, en déchargeant chacune d'elles, au moyen de l'excitateur, comme si elle était seule; ou bien simultanément, en

faisant communiquer l'armature intérieure de la première avec l'armature extérieure de la dernière.

605. **Jarres et batteries électriques.** — Une *jarre* est une grande bouteille de Leyde à goulot assez large pour qu'on puisse coller sur sa paroi interne une feuille d'étain qui sert d'armature intérieure. La tige qui traverse le bouchon est droite et terminée, à la partie inférieure, par une chaîne métallique qui la met en communication avec la feuille d'étain formant l'armature intérieure.

Une *batterie* est une réunion de plusieurs jarres placées dans

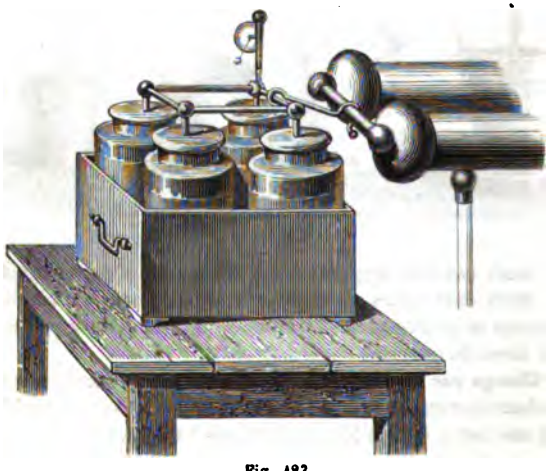


Fig. 423.

une caisse de bois (fig. 423), et communiquant ensemble, à l'intérieur, au moyen de tiges de métal, et extérieurement par une feuille d'étain qui revêt le fond de la caisse et se trouve en contact avec les armatures extérieures des jarres. Cette même feuille d'étain se prolonge latéralement jusqu'à la rencontre de deux poignées métalliques fixées sur les parois de la caisse. La batterie se charge, comme le montre la figure ci-dessus, en faisant communiquer les armatures intérieures avec la machine électrique, et les armatures extérieures avec le sol par le bois même de la caisse et de la table sur laquelle est placée la batterie, ou mieux par une chaîne métallique fixée à l'une des poignées de la caisse. Un électromètre à cadran, fixé à l'une des jarres, sert à indiquer la charge de la batterie. Malgré la grande quantité d'électricité accumulée dans l'appareil,

l'électromètre ne diverge que fort lentement et d'un petit nombre de degrés, ce qui ne doit pas étonner, puisque la divergence n'a lieu qu'en vertu de la différence de tension entre les deux armatures. Le nombre des jarres est, en général, de quatre, six ou neuf. Plus elles sont grandes et nombreuses, plus il faut de temps pour charger la batterie, mais plus ses effets sont puissants.

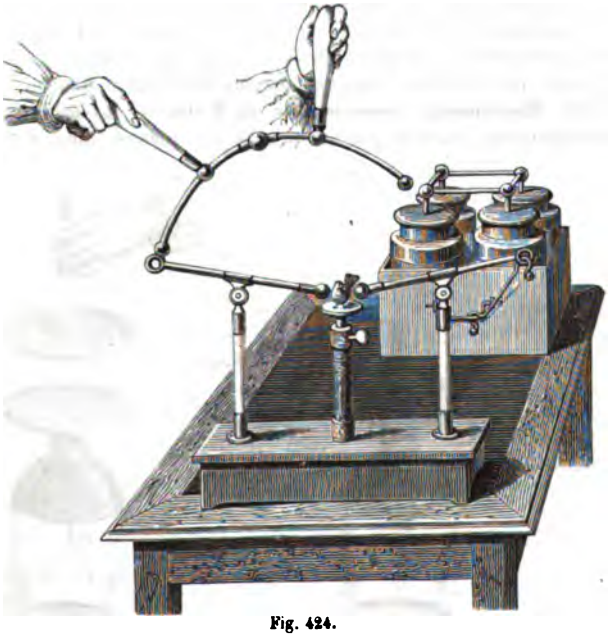


Fig. 424.

Lorsqu'on veut décharger une batterie, on fait communiquer entre elles les deux armatures au moyen de l'excitateur, en ayant soin de toucher d'abord l'armature extérieure. On doit faire usage ici de l'excitateur à manche de verre, et prendre toutes les précautions nécessaires pour éviter la commotion, car, avec une forte batterie, elle peut entraîner des accidents graves et même la mort.

Quand on veut foudroyer un animal, un objet quelconque, on fait usage de l'*excitateur universel* dessiné sur le premier plan de la figure 424. C'est une petite caisse de bois portant deux

colonnes de verre sur lesquelles sont fixées, à charnières, des tiges de cuivre. Entre ces colonnes est un pied de bois qui porte un petit plateau où se place l'objet ou l'animal sur lequel on veut expérimenter. Les deux tiges de cuivre étant dirigées vers cet objet, on fait communiquer l'une d'elles avec l'armature extérieure de la batterie, et l'autre avec une des boules de l'excitateur à manche de verre. Approchant alors la seconde boule de celui-ci vers l'armature intérieure, une étincelle part entre cette boule et l'armature, et une autre entre les branches de l'excitateur universel : c'est cette dernière qui foudroie l'objet ou l'animal placé sur le plateau.

606. **Électromètre condensateur de Volta.** — *L'électromètre condensateur*, imaginé par Volta, n'est autre chose que l'électro-

Fig. 425.

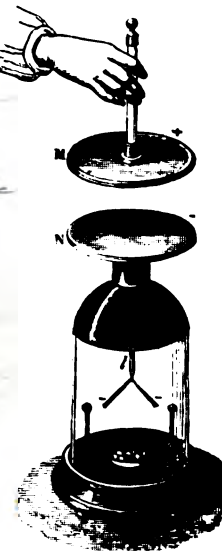


Fig. 426 (h = 38).

mètre à feuilles d'or déjà décrit (584), rendu beaucoup plus sensible par l'addition de deux disques condensateurs. La tige de cuivre qui porte les petites feuilles d'or, au lieu d'être terminée, à la partie supérieure, par une boule de laiton, l'est par un disque de même métal, sur lequel s'applique un second disque semblable,

mais à manche de verre. Les deux disques sont recouverts d'un vernis à la gomme laque qui les isole.

Pour rendre sensibles, au moyen de cet électromètre, des quantités d'électricité même très-faibles, on fait communiquer le corps sur lequel on veut reconnaître la présence de l'électricité, avec l'un des plateaux, qui prend alors le nom de *plateau collecteur*, et on met l'autre plateau en communication avec le sol en le touchant avec le doigt légèrement mouillé (fig. 425). L'électricité du corps soumis à l'expérience, se répandant alors sur le plateau collecteur, agit, au travers du taffetas, sur le second plateau et sur la main, pour repousser dans le sol l'électricité de même nom et attirer celle de nom contraire. Les deux fluides s'accumulent donc sur les deux plateaux, absolument comme dans le condensateur d'Æpinus (596), mais sans qu'il y ait divergence des feuilles d'or, puisqu'il y a neutralisation des deux électricités. L'appareil ainsi chargé, on retire le doigt d'abord, puis la source d'électricité, sans qu'on observe encore aucune divergence; mais si l'on enlève le plateau supérieur (fig. 426), la neutralisation cesse, et l'électricité du second plateau se distribuant également sur la tige et sur les feuilles d'or, celles-ci divergent très-fortement. On augmente la divergence en adaptant au pied de l'appareil deux tiges de cuivre terminées par des boules de même métal, car ces boules, en s'électrisant par l'influence des feuilles d'or, réagissent sur elles.

EFFETS DIVERS DE L'ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

607. **Effets physiologiques.** — Les effets de l'électricité statique se divisent en effets physiologiques, lumineux, calorifiques, mécaniques et chimiques.

Les *effets physiologiques* sont ceux que l'électricité produit sur les êtres vivants ou même recemment privés de la vie; ils consistent, chez les premiers, en une excitation violente qu'exerce le fluide électrique sur la sensibilité et la contractilité des tissus organiques qu'il traverse, et chez les derniers, en contractions musculaires brusques qui simulent le retour à la vie. Il ne sera question, pour le moment, que des actions physiologiques exercées par l'électricité statique à forte tension; plus tard, nous décrirons les effets physiologiques de l'électricité dynamique.

On connaît déjà la commotion que donne l'étincelle de la machine électrique (593). Cette commotion acquiert une bien plus grande

intensité et un caractère particulier, quand c'est de la bouteille de Leyde qu'on tire l'étincelle, en touchant d'une main son armature extérieure et de l'autre son armature intérieure. Avec une petite bouteille, la commotion se fait sentir jusque dans le coude; avec une bouteille d'un litre, on la ressent jusque dans l'épaule, et jusque dans la poitrine avec des bouteilles plus grandes.

La bouteille de Leyde peut donner simultanément la commotion électrique à un très-grand nombre de personnes. Pour cela, celles-ci doivent *former la chaîne*, c'est-à-dire se donner la main d'une manière continue; puis, la première touchant l'armature extérieure d'une bouteille chargée d'avance, et la dernière touchant en même temps le bouton de l'armature intérieure, toutes reçoivent simultanément la commotion, qu'on peut graduer à volonté en chargeant plus ou moins la bouteille. L'abbé Nollet donna ainsi la commotion à un régiment entier, et quinze cents hommes la ressentirent en même temps, d'une manière violente, dans les bras et la poitrine. Dans cette expérience, on a observé que les hommes qui sont au milieu de la chaîne éprouvent une commotion moins vive que ceux qui sont rapprochés de la bouteille.

Avec les grandes bouteilles de Leyde et les batteries, la commotion ne peut plus se recevoir impunément. Priestley a tué des rats avec des batteries dont chaque armature avait une surface totale de 63 décimètres carrés, et des chats avec des armatures dont la surface était de 3 mètres carrés et demi.

608. **Effets lumineux.** — La recomposition des deux électricités à forte tension s'opère toujours avec un dégagement de lumière plus ou moins intense : c'est ce qui arrive quand on tire des étincelles de la machine électrique, de la bouteille de Leyde et des batteries. L'éclat de la lumière électrique est d'autant plus vif que les corps entre lesquels a lieu l'explosion sont meilleurs conducteurs, et sa couleur varie non-seulement avec la nature de ces corps, mais avec l'atmosphère ambiante et la pression.

L'étincelle qui éclate entre deux baguettes de charbon est jaune; entre deux boules de cuivre argentées, elle est verte; avec des boules de bois ou d'ivoire, elle est cramoisie. Dans l'air, à la pression ordinaire, la lumière électrique est blanche et brillante; dans un air raréfié, elle est rougeâtre; dans le vide, elle est violacée, ce qui provient de ce que plus la résistance qui s'oppose à la recomposition des deux électricités est faible, moins l'électricité acquiert de tension. Dans l'oxygène, l'étincelle est blanche de même que dans l'air; dans l'hydrogène, elle est rougeâ-

tre, et verte dans la vapeur de mercure; dans l'acide carbonique, elle est verte; dans l'azote, elle est bleue ou pourpre, et accompagnée d'un bruit particulier. En général, l'étincelle a d'autant plus d'éclat que la tension est plus grande. M. Fusinieri ayant fait voir que, dans l'explosion de l'étincelle électrique, il y a toujours transport de particules matérielles à un état de ténuité extrême, on doit en conclure que les modifications que présente la lumière électrique sont dues à la matière pondérable transportée.

Fig. 427 (h = 60).

On étudie les effets de la pression de l'air, ou plutôt de sa non-conductibilité, sur l'éclat de la lumière électrique, au moyen de l'*œuf électrique*. On nomme ainsi un globe de verre porté sur un pied de cuivre, dans lequel sont deux tiges de laiton terminées en boule (fig. 427). La tige inférieure est fixe, et la tige supérieure glisse à frottement dans une boîte à cuir, de manière à pouvoir être approchée ou écartée à volonté. Cela posé, le vide étant fait dans le globe, au moyen de la machine pneumatique, sur laquelle il peut se visser, on fait communiquer la tige supérieure avec une forte machine électrique, et le pied avec le sol. Si l'on charge alors la machine, on observe d'une boule à l'autre, une lumière violacée, peu intense et continue, qui est due à la recomposition du fluide positif de la boule supérieure avec le fluide négatif de la boule inférieure. Si on laisse rentrer l'air peu à peu, à l'aide d'un robinet adapté au pied de l'appareil, la tension augmente avec la résistance, et la lumière, qui redevient blanche et brillante, n'apparaît plus que sous la forme de l'étincelle ordinaire.

609. **Tube, carreau et bouteille étincelants.** — Le *tube étincelant* est formé d'un tube de verre d'un mètre de longueur environ, dans lequel on a collé une série de petites feuilles d'étain taillées en forme de losange, et disposées en hélice tout le long du tube, de manière à ne laisser entre elles que des solutions de continuité fort petites. Aux extrémités sont deux viroles de cuivre avec crochet, et communiquant avec les deux bouts de l'hélice. Cela posé,

si, tenant le tube par un bout, on présente l'autre à la machine électrique, comme le montre la figure 428, des étincelles jaillissent

Fig. 428.

simultanément à chaque solution de continuité et produisent une brillante traînée lumineuse, surtout dans l'obscurité.

Le *carreau magique*, fondé sur le même principe que le tube

Fig. 429 (h = 41).

étincelant, se compose d'un carreau de verre ordinaire sur lequel est collée une bande d'étain très-étroite, se repliant un grand nombre de fois parallèlement à elle-même, comme le montre le trait noir représenté dans la figure 429. Sur cette bande d'étain, on pratique, avec un instrument tranchant, des solutions de continuité très-

petites, disposées de manière à représenter un objet déterminé, par exemple, un portique, une fleur, etc.; puis, fixant le carreau entre deux colonnes de verre, on met l'extrémité supérieure de la bande d'étain en communication avec la machine électrique, et l'autre extrémité avec le sol. Tournant alors le plateau de la machine, l'étincelle jaillit à chaque solution de continuité et reproduit, en traits de feu, l'objet qu'on a figuré sur le verre.

Fig. 430.

La *bouteille étincelante* est une bouteille de Leyde dont l'armature extérieure est formée d'une couche de vernis sur laquelle on a déposé une poussière métallique. Une bande d'étain, collée au bord inférieur de la bouteille, est en communication avec le sol, au moyen d'une chaîne de métal (fig. 430); une seconde bande placée plus haut porte un appendice arrivant à deux centimètres environ du crochet, qui est très-recourbé. Cette bouteille étant suspendue à la machine électrique, comme le montre le dessin, à mesure qu'elle se charge, l'étincelle part entre le crochet et l'armature, et de longues et brillantes étincelles éclatent sur tout le contour de l'appareil.

610. **Effets calorifiques.** —L'étincelle électrique n'est pas seulement lumineuse, elle est aussi une source de chaleur très-intense. En traversant les liquides combustibles, comme l'alcool, l'éther, elle les enflamme; elle agit de la même manière sur la poudre à canon, la résine pulvérisée, et fond même

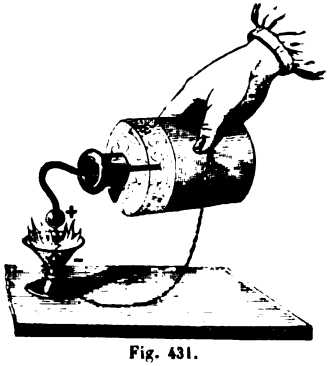


Fig. 431.

les métaux, mais alors il faut une batterie puissante. Une bouteille de Leyde ordinaire suffit pour enflammer l'alcool ou l'éther, au moyen du petit appareil que représente la figure 431. C'est un petit vase de verre, dont le fond est traversé par une tige de cuivre à bouton, fixée à un pied de même métal. Ayant versé le liquide dans le vase de manière que le bouton soit entièrement recouvert, on présente à celui-ci le crochet d'une bouteille de Leyde chargée, en ayant soin de faire communiquer le pied de cuivre avec l'armature extérieure au moyen d'un fil métallique. Ce fil et le pied du vase remplissant l'office d'excitateur, l'étincelle jaillit au travers du liquide et l'enflamme. Avec l'éther, l'expérience réussit très-bien ; mais pour réussir facilement avec l'alcool, il faut d'avance chauffer un peu le liquide.

Lorsqu'on fait passer la décharge d'une batterie dans un fil de fer ou d'acier, il devient rouge blanc et brûle avec une lumière éblouissante. Les fils de platine, d'or, d'argent, sont fondus et volatilisés. Van-Marum, avec une forte machine à deux plateaux et une puissante batterie, a fondu un fil de fer de 16 mètres de longueur.

Si l'on soumet à la décharge d'une batterie une feuille d'or isolée entre deux lames de verre ou entre deux rubans de soie, l'or est volatilisé, et on a pour résidu une poudre violette qui n'est autre chose que de l'or très-divisé. C'est ainsi qu'on obtient les *portraits électriques*.

611. **Effets mécaniques.** — Les effets mécaniques sont des déchirements, des ruptures, des expansions violentes, qui résultent, dans les corps peu conducteurs, du passage d'une forte décharge électrique. Le verre est percé, le bois, les pierres, sont brisés, les gaz et les liquides sont fortement ébranlés. Les effets mécaniques de l'étincelle électrique se démontrent au moyen de différents appareils, qui sont le *perce-verre*, le *perce-carte*, le *thermomètre de Kinnersley* et l'*excitateur universel*.

Le perce-verre, représenté dans la figure 432, se compose de deux colonnes de verre qui supportent, au moyen d'une traverse horizontale, un conducteur B, terminé en pointe. La lame de verre A, qu'il s'agit de percer, repose sur un cylindre isolant, de verre, dans lequel est un second conducteur aussi terminé en pointe. Celui-ci étant mis en communication, par un fil métallique, avec l'armature extérieure d'une forte bouteille de Leyde, on approche le crochet de la bouteille du bouton qui termine le conducteur B. L'étincelle éclate alors entre les deux conducteurs, et le verre est

percé. Toutefois, cette expérience ne réussit avec une bouteille de Leyde un peu forte qu'autant que la lame de verre est assez mince; autrement il faut faire usage d'une batterie. Le même appareil sert très-bien de perce-carte.

L'ébranlement et l'expansion subite que l'étincelle fait naître dans les gaz se démontrent au moyen du thermomètre de Kinnersley. Cet appareil se compose d'un fort tube de verre mastiqué, à ses deux

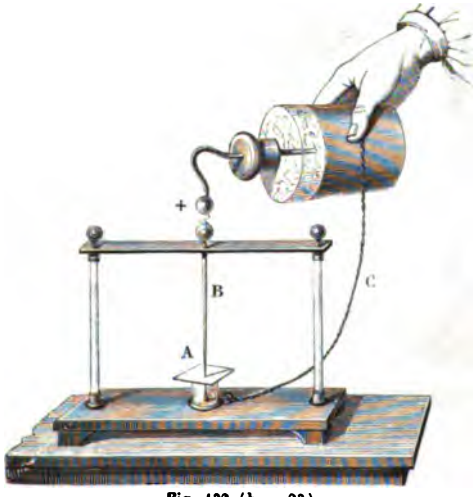


Fig. 432 (h = 23).

bouts, dans des tubes de cuivre qui le ferment hermétiquement et supportent deux conducteurs terminés en boule, l'un fixe, l'autre glissant à volonté dans une boîte à cuir (fig. 433). Sur le côté de l'appareil est un second tube ouvert à sa partie supérieure. Cela posé, ayant dévissé la boîte à cuir, on verse de l'eau dans le gros tube jusqu'à ce que le niveau se trouve un peu au-dessous de la boule inférieure; serrant alors la boîte à cuir, on fait passer la décharge d'une bouteille de Leyde entre les deux boules, en s'y prenant comme le montre le dessin. L'eau, instantanément refoulée hors du gros tube, s'élève de deux centimètres environ dans le petit; mais le niveau se rétablit aussitôt, ce qui montre que le phénomène n'est point dû à une élévation de température, et que la dénomination de thermomètre donnée à l'appareil est fausse.

L'excitateur universel, déjà décrit en parlant des batteries, et

représenté dans la figure 424, sert aussi à obtenir des effets mécaniques. Veut-on, par exemple, faire éclater un morceau de bois, on le place sur le petit plateau où l'on a figuré un oiseau, en lui faisant toucher les deux boules des conducteurs. Faisant alors passer la décharge, le morceau de bois vole en éclats.

Fig. 433 (h = 28).

612. **Effets chimiques.** — Les effets chimiques de l'électricité sont des combinaisons et des décompositions que détermine l'étincelle électrique lorsqu'elle traverse les corps. Par exemple, quand deux gaz sont mélangés à peu près dans le rapport suivant lequel se fait leur combinaison, une seule étincelle suffit pour la déterminer; mais si le mélange est loin de ce rapport, la combinaison exige une longue série d'étincelles. Priestley reconnut, le premier, que lorsqu'on fait passer pendant longtemps des étincelles électriques au travers d'une quantité déterminée d'air atmosphérique, le volume d'air diminue, et de la teinture de tournesol, introduite dans le vase qui le contient, rougit. Cavendish ayant répété cette expérience avec soin, trouva qu'il se formait, en présence de l'eau ou des bases, de l'acide azotique résultant de la combinaison de l'oxygène et de l'azote de l'air.

Un grand nombre de gaz sont décomposés par l'action successive de l'étincelle électrique. L'hydrogène carboné, l'acide sulfhydrique, l'ammoniaque, le sont complétement; l'acide carbonique ne l'est qu'en partie, en oxygène et en oxyde de carbone. L'étincelle des machines décompose même les oxydes, l'eau et les sels; toutefois, l'électricité statique est loin de présenter des effets chimiques aussi énergiques et aussi variés que l'électricité dynamique.

613. **Pistolet de Volta.** — Le *pistolet de Volta* est un petit

appareil qui sert à démontrer les effets chimiques de l'étincelle électrique. Il se compose d'un vase de fer-blanc (fig. 434), dans lequel on introduit un mélange détonant formé de deux volumes d'hydrogène et d'un volume d'oxygène, puis on le ferme hermétiquement avec un bouchon de liége. Sur la paroi latérale est une tubulure dans laquelle passe une tige métallique terminée par deux petites

Fig. 434.

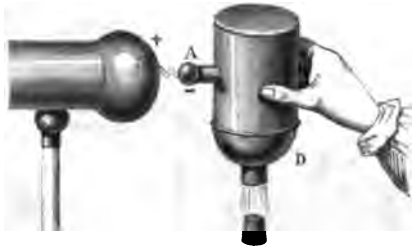


Fig. 435 (h = 11).

boules A et B, et mastiquée dans un tube de verre qui l'isole du reste de l'instrument.

Cela posé, tenant celui-ci à la main, comme le représente la figure 435, on l'approche de la machine électrique. Le bouton A s'électrisant alors négativement par influence, et le bouton B positivement, l'étincelle part entre le bouton A et la machine, et, dans le même instant, une deuxième étincelle jaillit entre le bouton B et la paroi du vase qui communique avec le sol par la main. C'est cette dernière étincelle qui détermine la combinaison des deux gaz. Cette combinaison étant accompagnée d'un vif dégagement de chaleur (383), la vapeur d'eau qui prend naissance acquiert une force expansive telle que le bouchon est projeté avec une détonation analogue à celle d'un coup de pistolet.

614. **Eudiomètre.** — Les *eudiomètres*, dont on se sert, en chimie, pour faire l'analyse des gaz, sont encore des appareils fondés sur les effets chimiques de l'électricité.

On a modifié ces appareils de plusieurs manières : la figure 436 représente l'eudiomètre le plus simple. Il se compose d'une éprouvette de cristal, à paroi très-épaisse. L'extrémité fermée de l'éprouvette est traversée par une tige de fer ou de laiton, terminée par deux boules *m* et *n*, l'une extérieure, l'autre intérieure. Près de la boule intérieure *n* en est une seconde *a*, à laquelle est fixé un fil

de fer ou de laiton, qui est contourné en hélice, et se prolonge jusqu'à la partie ouverte de l'eudiomètre.

Cela posé, pour faire, avec cet instrument, l'analyse d'un gaz, de l'air, par exemple, on le remplit d'abord d'eau; puis on le renverse ainsi rempli d'eau sur une cuve à eau, et on y fait passer, à l'aide

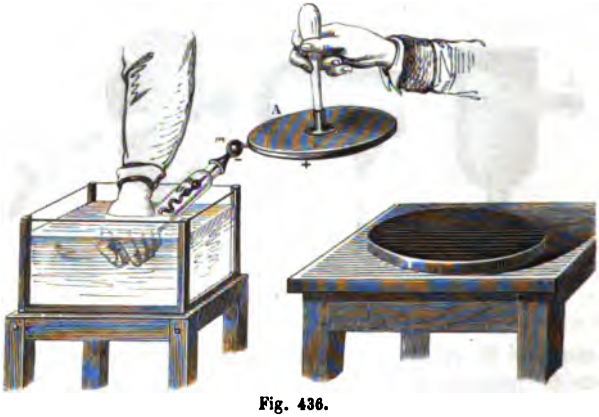


Fig. 436.

d'un entonnoir, 100 parties d'air et 100 parties d'hydrogène, qu'on a mesurées avec un tube gradué. On ferme ensuite l'eudiomètre avec le pouce, comme le montre la figure, en ayant soin de mettre celui-ci en communication avec le fil en hélice qui est dans l'intérieur de l'eudiomètre. Si un aide approche alors le plateau d'un électrophore (585) de la boule *m*, une étincelle part entre celle-ci et le plateau A, et, en même temps, une seconde étincelle éclate entre les deux boules *n* et *a*. C'est cette dernière étincelle qui détermine, avec une vive lumière, la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène qui sont dans l'eudiomètre, pour former de l'eau. Si l'on mesure alors, en le faisant passer dans un tube gradué, le gaz qui reste dans l'instrument, on trouve sensiblement que son volume est 137; il a donc disparu 63 parties des gaz mélangés, et comme on sait que l'eau est formée de 2 volumes d'hydrogène pour 1 d'oxygène, il s'ensuit que le tiers de 63, ou 21, est le volume d'oxygène contenu dans 100 parties d'air.

LIVRE X

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

CHAPITRE PREMIER

PILE VOLTAÏQUE; SES MODIFICATIONS.

615. **Expérience et théorie de Galvani.** — C'est à Galvani, professeur d'anatomie à Bologne, qu'est due l'expérience fondamentale qui a fait découvrir l'électricité dynamique (563), ou le *galvanisme*, cette branche nouvelle de la physique, si remarquable par les nombreuses applications qu'elle a reçues depuis un demi-siècle.

Galvani étudiait depuis plusieurs années l'influence de l'électricité sur l'irritabilité nerveuse des animaux, et particulièrement de la grenouille, lorsqu'en 1786 il eut occasion d'observer que les nerfs lombaires d'une grenouille morte s'étant trouvés en communication, par un circuit métallique, avec les muscles cruraux, ceux-ci se contractèrent vivement.

Pour répéter l'expérience de Galvani, on écorche une grenouille encore vivante, et on la coupe au-dessous des membres antérieurs (fig. 437); puis, après avoir mis à nu les nerfs lombaires situés des deux côtés de la colonne vertébrale, sous la forme de filets blancs, on prend un conducteur métallique formé de deux arcs, zinc et cuivre, et, introduisant l'un d'eux entre les nerfs et la colonne vertébrale, on fait toucher l'autre aux muscles de l'une des cuisses ou des jambes. A chaque contact, les muscles se replient et s'agitent, et cette moitié de grenouille semble reprendre vie pour sauter.

Galvani, qui déjà avait reconnu, dès 1780, que l'électricité des machines électriques produisait, sur les grenouilles mortes, des commotions analogues, attribua le phénomène que nous venons de décrire à l'existence d'une électricité inhérente à l'animal, et regardant le muscle comme une bouteille de Leyde et le nerf comme un simple conducteur, il admit qu'au moment de la contraction, le fluide positif circulait du nerf au muscle au travers du circuit métallique, et du muscle au nerf dans le corps de la grenouille.

Sous le nom d'*électricité animale*, ou de *fluide galvanique*, un grand nombre de savants, et les physiologistes surtout, adoptèrent la théorie de Galvani. Celle-ci rencontra cependant des contradicteurs, dont le plus ardent fut Volta, professeur de physique à Pavie,

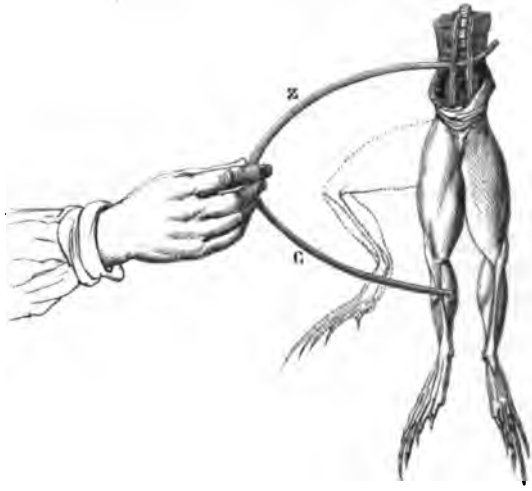


Fig. 437.

déjà connu par l'invention de l'électrophore, de l'électromètre condensateur et de l'eudiomètre.

616. **Expérience de Volta.** — L'attention de Galvani s'était portée exclusivement sur les nerfs et les muscles de la grenouille ; celle de Volta se porta sur les métaux qui servent à établir la communication. Se fondant sur l'observation, qui n'avait point échappé à Galvani, que la contraction musculaire est beaucoup plus énergique lorsque l'arc est composé de deux métaux que lorsqu'il l'est d'un seul, Volta attribua aux métaux le rôle actif dans le phénomène de la contraction. Il admit que c'était par l'effet même de leur contact qu'il y avait dégagement d'électricité, et que les parties animales ne jouaient là que le rôle de conducteur et, en même temps, d'électroscope très-sensible.

A l'aide de l'électromètre condensateur qu'il venait d'inventer, Volta parut, en effet, démontrer, par de nombreuses expériences, le développement de l'électricité au contact des métaux. Nous cite-

rons la suivante, facile à répéter : on pose le doigt mouillé sur le plateau supérieur de l'électromètre condensateur (fig. 425, p. 576), puis on touche le plateau inférieur avec une lame de cuivre *c* soudée à une lame de zinc *z* qu'on tient de l'autre main; rompant ensuite les communications et enlevant le plateau supérieur (fig. 426), les feuilles d'or divergent, et on constate qu'elles sont électrisées négativement, ce qui conduit à admettre que, soudés ensemble, le cuivre s'est chargé d'électricité négative et le zinc d'électricité positive. Du reste, dans cette expérience, l'électricité ne peut être attribuée au frottement ou à la pression, car si, retournant les lames *cz*, on touche le plateau du condensateur, qui est en cuivre, avec la lame de zinc *z*, en tenant à la main la lame *c* qui lui est soudée, on n'obtient aucune trace d'électricité.

Une lutte mémorable s'engagea alors entre Volta et Galvani. Ce dernier, soutenant avec une profonde conviction sa théorie de l'électricité animale, fit voir que la présence de deux métaux n'était pas indispensable à la production du phénomène, et qu'on obtient des contractions en posant sur un bain de mercure très-pur une grenouille morte et fraîchement préparée. Enfin, il fit voir qu'en rapprochant les nerfs lombaires de la grenouille des muscles cruraux, il se produit, au moment du contact, une vive contraction. Or, dans cette dernière expérience, les métaux ne jouaient plus aucun rôle, et la théorie de Galvani paraissait victorieuse; mais Volta la combattit alors en donnant plus d'extension à sa théorie du contact, et en posant ce principe général, que ***deux substances hétérogènes quelconques, mises en contact, se constituent toujours, l'une à l'état positif, l'autre à l'état négatif.***

Cependant Galvani fit une dernière expérience dans laquelle il était impossible d'admettre un effet de contact, puisqu'il ne faisait toucher que des substances homogènes. Il posa sur un disque de verre une cuisse de grenouille munie de son nerf lombaire, et, à côté, une seconde cuisse disposée de la même manière; ayant posé le nerf de la seconde sur celui de la première, en sorte qu'au point de contact il n'y eût que de la substance nerveuse, il fit toucher les deux cuisses et obtint une forte contraction. Galvani était donc parvenu à démontrer l'existence de l'électricité animale, mise en évidence de nos jours par M. Matteucci, sous le nom de *courant propre* de la grenouille.

617. **Théorie de Volta.** — Volta, physicien avant tout, et ne considérant que les conditions physiques du problème, rejeta la théorie de l'électricité animale, et admit exclusivement la théorie

du contact, qui peut se formuler par les deux principes suivants :

1° Le contact de deux corps hétérogènes donne toujours naissance à une force, que Volta a désignée sous le nom de *force électro-motrice*, et qui a pour caractère non-seulement de décomposer une partie de leur électricité naturelle, mais encore de s'opposer à la recomposition des électricités contraires accumulées sur les deux corps en contact.

2° Lorsque deux substances hétérogènes sont en contact, la différence algébrique de leur état électrique est constante, pour les mêmes corps, dans quelques conditions qu'on les place, et égale à la force électro-motrice. C'est-à-dire que si l'on enlève aux deux corps, ou si on leur communique une quantité quelconque d'électricité, la différence de leur état électrique relatif n'est pas modifiée : dans le premier cas, la force électro-motrice reproduit immédiatement une quantité d'électricité égale à celle qui a été soustraite; dans le second, l'excès d'électricité communiquée se distribue également sur les deux corps, d'où il résulte que la différence des deux états électriques reste la même. Par exemple, deux disques, zinc et cuivre, étant mis en contact et isolés tous les deux, si l'on représente par + 1 l'électricité positive du zinc, et par — 1 l'électricité négative du cuivre, et qu'on communique à ce système une quantité d'électricité positive 20, on aura sur le zinc 20 + 1, ou 21, et sur le cuivre 20 — 1, ou 19. Or, la différence, qui était 2 entre les états électriques + 1 et — 1, est encore 2 entre les états électriques 21 et 19.

La force électro-motrice admise par Volta ne paraissant pas dégager la même quantité d'électricité au contact de toutes les substances, ce physicien divisa les corps en *bons électro-moteurs* et en *faibles électro-moteurs*. Dans la première classe sont les métaux et le charbon bien calciné; dans la seconde, les liquides et, en général, les corps non métalliques. Les métaux eux-mêmes ne sont pas également bons électro-moteurs; ce sont le zinc et le cuivre qui, soudés ensemble, le sont au plus haut degré. Enfin, l'espèce d'électricité développée change avec la nature des substances en contact. Le zinc, le fer, l'étain, le plomb, le bismuth et l'antimoine s'électrisent positivement dans leur contact avec le cuivre; dans le même cas, l'or, l'argent et le platine s'électrisent négativement.

C'est en se basant sur la théorie du contact que Volta fut conduit à inventer le merveilleux appareil qui a immortalisé son nom. Cette théorie, cependant, ne tarda pas, elle aussi, comme celle de Galvani, à rencontrer de nombreux contradicteurs, et c'est surtout

aux actions chimiques, ainsi que nous le ferons connaître plus tard, qu'on attribue aujourd'hui le dégagement d'électricité que Volta attribuait uniquement au contact.

618. **Pile de Volta.** — On donne le nom général de *pile* à tous les appareils qui servent à développer de l'électricité dynamique. Le premier appareil de ce genre, inventé par Volta en 1800, se compose d'une suite de disques empilés les uns sur les autres dans l'ordre suivant : un disque de cuivre, un disque de zinc, une rondelle de drap mouillée d'eau acidulée, puis encore un disque de cuivre, un disque de zinc, une rondelle de drap, et ainsi de suite, toujours dans le même ordre, comme le montre la figure 438. De là la dénomination de *pile*, qui est restée, quoique cet appareil ait reçu des dispositions tout à fait différentes. On soude ordinairement ensemble, deux par deux, les disques de zinc et de cuivre, de manière à former des *couples*, séparés par les rondelles humides, et maintenus verticalement par trois tubes de verre pleins, comme le montre le dessin. La forme de cet appareil lui a fait donner le nom de *pile à colonne*.

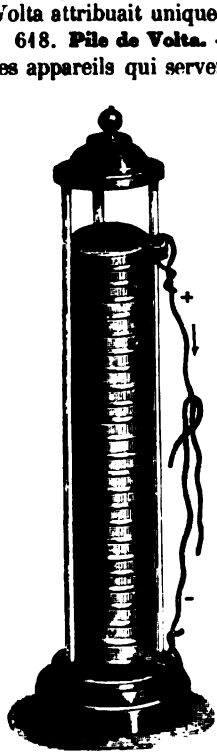


Fig. 438.

La distribution de l'électricité n'est pas la même dans cette pile, selon qu'elle est en communication avec le sol par l'une de ses extrémités, ou selon qu'elle est isolée, ce qui s'obtient en la posant sur un plateau de verre ou de résine, ou même sur du bois, qui ne conduit pas, d'une manière sensible, l'électricité de la pile.

Dans le premier cas, l'expérience montre que l'extrémité en communication avec le sol est à l'état naturel, et que le reste de la pile ne contient qu'une espèce d'électricité, qui est positive si c'est par un disque de cuivre que se termine l'extrémité de la pile communiquant au sol, et négative si c'est par un disque de zinc. Quant à la tension, elle devrait croître, dans la théorie de Volta (617, 2°), proportionnellement au nombre des couples; mais l'expérience montre qu'elle croît moins vite.

La distribution de l'électricité n'est plus la même dans la pile isolée. On constate alors, au moyen du plan d'épreuve et de l'électromètre, que la partie médiane est à l'état naturel, que chaque moitié est tout entière chargée, l'une d'électricité positive, l'autre d'électricité négative, et que la tension croît de part et d'autre, du milieu jusqu'aux extrémités. C'est la moitié terminée par un zinc qui est chargée d'électricité positive, et celle terminée par un cuivre qui l'est d'électricité négative. On verra, dans la théorie chimique, quelle est la cause de cette distribution de l'électricité dans la pile.

Dans cette théorie, la seule généralement admise aujourd'hui, c'est l'eau acidulée des rondelles qui, en agissant chimiquement sur le zinc, est la source d'électricité. L'eau acidulée s'électrise alors positivement et le zinc négativement; d'où ce dernier cède, par conductibilité, son électricité négative au cuivre, ce qui explique comment le disque de cuivre qui termine la pile, à sa partie inférieure, dans la figure 438, est électrisé négativement. Quant à l'extrémité supérieure, qui se termine par un couple zinc et cuivre, tout ce couple est électrisé positivement par la rondelle acidulée qui est au-dessous de lui; d'où il est facile de voir que le zinc supérieur est inutile, et que la pile pourrait se terminer en haut comme en bas par un cuivre.

Dans la théorie du contact, ce qui constitue un couple de la pile, c'est la réunion d'un zinc et d'un cuivre soudés ensemble; mais dans la théorie chimique, ce qu'on doit réellement entendre par un couple, c'est le système d'un zinc et d'un cuivre séparés par une rondelle imbibée d'eau acidulée.

619. **Tension de la pile.** — La *tension* d'une pile est la tendance de l'électricité accumulée aux extrémités à se dégager et à vaincre les obstacles qui s'opposent à son déplacement. On ne doit pas confondre la tension d'une pile avec la *quantité* d'électricité qu'elle peut dégager. La tension dépend surtout du nombre des couples, tandis que la quantité d'électricité, toutes choses égales d'ailleurs, croît avec la surface des couples. Plus cette surface est grande, plus, à tension égale, la quantité d'électricité qui circule dans la pile est considérable. Cette quantité croît aussi avec la conductibilité du liquide interposé entre les couples. La tension, au contraire, est indépendante de la nature de ce liquide.

A moins d'un nombre de couples considérable, la tension, aux extrémités de la pile, est toujours beaucoup plus faible que dans les machines électriques. En effet, non-seulement chaque extrémité, considérée seule, ne donne pas d'étincelle, mais elle n'attire pas les

corps légers, et ce n'est qu'à l'aide de l'électromètre condensateur à feuilles d'or qu'on parvient à rendre la tension sensible. Pour cela, on fait communiquer l'un des plateaux de l'électromètre avec une des extrémités de la pile, et l'autre avec l'autre extrémité ou avec le sol. L'appareil se charge alors instantanément, et rompant les communications, on voit les feuilles d'or diverger. On peut même charger une bouteille de Leyde lorsqu'on fait communiquer l'armature intérieure avec une des extrémités de la pile et l'armature extérieure avec l'autre; mais cette charge est beaucoup plus faible que celle fournie par la machine électrique.

620. **Pôles, électrodes, courants.** — Dans une pile, on nomme *pôle positif* l'extrémité où tend à s'accumuler le fluide positif, et *pôle négatif* celle où tend à s'accumuler le fluide négatif. C'est le dernier zinc qui tend à être le pôle positif, et le dernier cuivre, le pôle négatif; mais comme on a vu ci-dessus (618) que dans la pile à colonne on peut supprimer le dernier zinc sans rien changer à la distribution de l'électricité, en sorte que chaque pôle correspond alors à un cuivre, et comme il en sera de même dans les diverses piles qui nous restent à faire connaître, il en résulte qu'il y aurait confusion si l'on désignait les pôles par les noms des métaux auxquels ils correspondent. En un mot, ce n'est pas la nature des métaux qui terminent la pile qui doit déterminer tel ou tel pôle, mais l'ordre dans lequel ces métaux sont disposés. C'est-à-dire que le pôle positif est toujours à l'extrémité vers laquelle les zincs de chaque couple sont tournés, et le pôle négatif à l'extrémité vers laquelle sont tournés tous les cuivres.

On appelle *électrodes* ou *rhéophores* deux fils métalliques fixés aux pôles de la pile (fig. 438), et destinés à les faire communiquer entre eux, en sorte que les extrémités de ces fils deviennent elles-mêmes les pôles.

Enfin, on désigne sous le nom de *courant* la recomposition des électricités contraires qui s'opère d'un pôle à l'autre d'une pile, lorsqu'ils communiquent entre eux au moyen des électrodes ou d'un corps conducteur quelconque. Les effets des piles démontrent que les courants sont continus, ce qui prouve qu'à mesure que les deux électricités se réunissent par le fil conjonctif, la force électromotrice, ou plutôt l'action chimique, décompose une nouvelle quantité d'électricité naturelle dans la pile.

On admet ordinairement, dans un courant, une direction déterminée, en supposant qu'il va du pôle positif au pôle négatif dans les électrodes, et du pôle négatif au pôle positif dans l'intérieur de

la pile; mais ce n'est là qu'une convention, car la recomposition s'opère également du pôle positif au pôle négatif et du pôle négatif au pôle positif. Dans tous les cas, le courant ne commence qu'au moment où les deux pôles sont mis en communication par un corps conducteur, ce qu'on exprime en disant que le *courant est fermé*. Toutes les propriétés de l'électricité à l'état de tension cessent alors, mais de nouvelles propriétés apparaissent, qui caractérisent les courants et qui seront décrites en parlant des effets des piles.

DIVERSES MODIFICATIONS DE LA PILE.

621. **Pile à auges.** — La pile de Volta a reçu diverses dispositions. Celle que nous avons décrite ci-dessus (618) présente l'in-

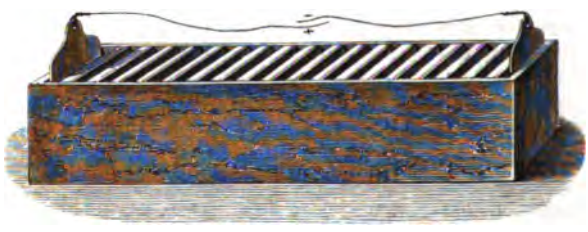


Fig. 439 (1 = 54).

convénient que les rondelles de drap, comprimées par le poids des disques, laissent écouler le liquide dont elles sont imbibées. C'est pour cette raison qu'on adopta promptement la *pile à auges*, qui n'est, pour ainsi dire, qu'une pile à colonne horizontale. Elle se compose d'une boîte rectangulaire de bois, enduite intérieurement d'un mastic isolant (fig. 439). Les plaques zinc et cuivre, soudées entre elles deux par deux, forment des couples qui ont une grandeur égale à la section intérieure de la boîte et qui sont fixés dans le mastic, de manière qu'il y ait, d'un couple à l'autre, des intervalles peu considérables formant autant de compartiments ou *auges*. Dans celles-ci, on verse un mélange d'eau et d'acide sulfurique qui produit le même effet que les rondelles dans la pile à colonne; les deux pôles communiquent entre eux au moyen de fils métalliques fixés à deux plaques de cuivre qui plongent dans les deux auges extrêmes. La théorie de cette pile est identiquement la même que celle de la pile à colonne.

622. Pile de Wollaston. — La *pile de Wollaston*, ou *pile à bocaux*, est une autre modification de la pile de Volta. Les plaques zinc et cuivre ne sont soudées que par leurs bords, ou même par une partie de leurs bords, les plaques de cuivre étant terminées par une languette qui se soude au zinc. Ces plaques sont recourbées de manière à plonger verticalement dans des bocaux de verre en partie remplis d'eau acidulée; mais les plaques zinc et cuivre,

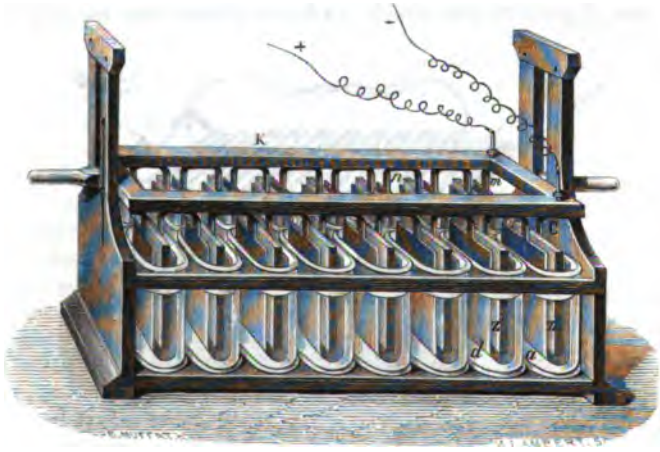


Fig. 440 (h = 85).

qui plongent dans un même bocal, appartiennent à des couples différents (fig. 440). A partir de la droite du dessin, une petite lame de cuivre C se soude à une plaque épaisse Z, de zinc, et toutes les deux constituent le premier couple. Une seconde lame de cuivre *a*, de même largeur que le zinc, l'entoure sans le toucher et se termine par une languette de cuivre *o*, soudée à un deuxième zinc Z' et formant avec lui le second couple. Le zinc de ce couple est de même entouré d'une plaque de cuivre *d* qui va se souder à un troisième zinc, et ainsi de suite, de manière à réunir autant de couples qu'on le veut. La figure ci-dessus représente une pile de 16 couples réunis parallèlement en deux séries de 8. Le premier cuivre C, étant soudé à un zinc, représente le pôle négatif. Quant au pôle positif, il correspond au dernier cuivre *m*, qui, n'étant en contact avec aucun zinc, ne fait qu'enlever au liquide le fluide

positif qui lui est fourni par le dernier couple. Tous les couples étant fixés à une traverse de bois qui peut s'élever ou s'abaisser à volonté entre quatre montants, on la soulève aussitôt qu'on ne veut plus faire fonctionner la pile. Ordinairement, l'eau des bocaux est chargée de $\frac{1}{16}$ d'acide sulfurique et $\frac{1}{50}$ d'acide azotique ; mais la pile marche très-bien si l'on ne met dans l'eau des bocaux que de l'acide sulfurique.

* 623. **Pile de Münch.** — Münch a donné à la pile de Wollaston une disposition plus simple, en faisant plonger tous les couples

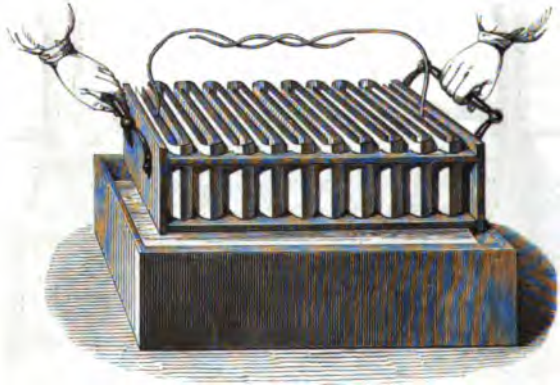


Fig. 441 (1 = 61).

dans une même auge de bois, mastiquée à l'intérieur. La figure 441, qui représente une pile de 20 couples, montre comment les plaques de ces couples sont soudées verticalement. Les plaques blanches sont les zincs, les autres sont les cuivres. Cette pile, sous un petit volume, donne des effets énergiques, mais peu constants.

Dans les différentes piles que nous venons de décrire, on donne aux plaques de zinc plus d'épaisseur qu'aux plaques de cuivre, parce que le premier métal est seul attaqué par l'acide sulfurique.

* 624. **Piles sèches.** — Les *piles sèches* sont de véritables piles à colonne dans lesquelles les rondelles acidulées sont remplacées par une substance solide hygrométrique. On en a construit de différentes sortes : dans la pile de Zamboni, qui est la plus en usage, les métaux électro-moteurs sont l'étain, ou l'argent, et le bioxyde de manganèse. Pour construire cette pile, on prend une feuille de papier argentée ou étamée sur l'une de ses faces, et sur l'autre on

fixe, avec un corps gras, du bioxyde de manganèse bien lavée. Ayant superposé sept ou huit de ces feuilles, on les découpe, avec un emporte-pièce, en disques de 25 millimètres de diamètre environ, et on superpose ces disques, dans le même ordre, de manière que l'argent ou l'étain de chaque disque soit en contact avec le manganèse du suivant. Ayant ainsi empilé de 1200 à 1800 couples, on termine la pile, à chaque bout, par un disque de cuivre, et on serre tout le système fortement avec des fils de soie, pour mieux établir les contacts. C'est alors au disque de cuivre en contact avec le manganèse que correspond le pôle positif; au disque de l'autre extrémité, c'est-à-dire au pôle argent ou étain, correspond le pôle négatif.

Les piles sèches sont remarquables par la durée de leur action, qui peut se prolonger plusieurs années. Leur énergie dépend beaucoup de la température et de l'état l'hygrométrique de l'air. Elle est plus forte en été qu'en hiver, et l'action d'une forte chaleur peut la raviver lorsqu'elle semble éteinte. Une pile de Zamboni de 2000 couples ne donne ni commotion, ni étincelle, mais elle peut charger la bouteille de Leyde et les autres condensateurs. Toutefois, il lui faut pour cela un certain temps, parce que l'électricité ne se meut que lentement dans son intérieur. Le développement de l'électricité dans ces piles est généralement attribué à une action chimique lente résultant de la décomposition des matières organiques dont le papier est imprégné.

* 625. **Électromètre de Bohnenberger.** — Bohnenberger a construit un électromètre à pile sèche d'une extrême sensibilité. C'est un électromètre condensateur (fig. 426) dont la tige ne porte qu'une seule feuille d'or suspendue à égale distance des pôles contraires de deux piles sèches, placées verticalement, dans l'intérieur de la cloche, sur le plateau qui sert de base à l'appareil. Aussitôt que la feuille d'or possède de l'électricité libre, elle est attirée par une des piles et repoussée par l'autre, et son électricité est évidemment contraire à celle du pôle vers lequel elle se dirige.

* 626. **Appareils à rotation.** — On construit, sous le nom de *jeux de bague*, de petits appareils à rotation continue, dont le mouvement persiste pendant plusieurs années. La figure 442 représente un appareil de ce genre. Deux colonnes de cuivre *a* et *b*, fixées sur un socle de bois, communiquent par leur base, l'une au pôle positif, l'autre au pôle négatif d'une forte pile sèche placée horizontalement au-dessous du socle. Cette pile est ordinairement formée de six piles plus petites communiquant entre elles et comprenant en tout 1800 couples.

Sur un pivot *c*, placé à égale distance des deux colonnes *a* et *b*, est une chape d'ivoire *i* à laquelle sont liés quatre supports qui soutiennent de petites figures peintes sur un carton très-léger. Ces supports se terminent par de petits étendards en clinquant fixés par de la gomme laque qui les isole. Ces étendards, attirés d'abord

Fig. 442.

par l'électricité des boules qui terminent les colonnes, les touchent et se chargent de la même électricité qu'elles. Repoussés alors, ils se mettent à tourner, et les deux étendards positifs, par exemple, qui sont repoussés par la colonns *a*, se trouvent au contraire attirés par la colonne *b*, qu'ils viennent toucher pour être repoussés de même, et ainsi de suite; d'où résulte un mouvement continu qui se prolonge tout le temps que la pile fonctionne, c'est-à-dire pendant plusieurs années.

PILES A DEUX LIQUIDES.

627. **Courants constants.** — Les diverses piles à colonne, à auges, de Wollaston, ou de Münch, décrites précédemment, et qui ont toutes pour caractère d'être composées de deux métaux et d'un

seul liquide, présentent le grave inconvénient de donner des courants dont l'intensité décroît très-rapidement.

Les causes de ce phénomène sont : 1° l'affaiblissement des actions chimiques par l'effet de la neutralisation de l'acide sulfurique à mesure qu'il se combine au zinc; 2° les *courants secondaires*, c'est-à-dire des courants qui se produisent dans les piles, en sens contraire du courant principal, et qui sont dus à la décomposition, par celui-ci, de l'eau qui se trouve entre les couples, et du sulfate de zinc qu'elle tient en dissolution. Dans cette double décomposition, il se dépose, sur le cuivre de chaque couple, de l'hydrogène et même de l'oxyde de zinc, ainsi qu'on le verra bientôt en parlant de la décomposition de l'eau et des sels par la pile (640 et 643). Ce sont ces dépôts qui donnent ensuite naissance à un second courant de direction contraire au premier et le neutralisant en partie.

Vu l'affaiblissement rapide de leur courant, les piles à un seul liquide sont à peu près sans usage aujourd'hui, et on leur substitue généralement des piles à deux liquides, qu'on désigne sous le nom de *piles à courant constant*, parce que leurs effets conservent assez longtemps une intensité sensiblement uniforme. On a beaucoup varié la forme de ces sortes de piles; les plus en usage sont la pile de Daniell, celle de Grove et celle de Bunsen.

Dans ces piles, on corrige les inconvénients des piles à un seul liquide, au moyen de deux liquides susceptibles de réagir l'un sur l'autre, et séparés par un diaphragme qui laisse passer facilement le courant, mais ne permet pas aux liquides de se mélanger, du moins rapidement; puis on fait plonger les deux éléments d'un même couple, l'un dans un des liquides, l'autre dans l'autre. Les conditions auxquelles doit ici satisfaire la construction de la pile, sont : 1° que l'un des éléments étant seul actif, l'autre n'éprouve aucune action chimique et n'agisse que comme conducteur; 2° que les deux liquides soient choisis de manière que le courant qui résulte de leur action mutuelle au travers du diaphragme, soit de même sens que celui auquel donne naissance l'action de l'acide sur le métal attaqué.

628. **Pile de Daniell.** — Une des premières piles à courant constant qui ait été construite est celle du chimiste anglais Daniell, qui l'inventa en 1836. La figure 443 représente un couple de cette pile, dont on a beaucoup varié la forme. Un vase V, de verre, est rempli d'une dissolution saturée de sulfate de cuivre, dans laquelle plonge un cylindre de cuivre rouge C, percé latéralement de plusieurs trous et ouvert aux deux bouts. A la partie supérieure de

ce cylindre est fixée une galerie annulaire G, percée sur son pourtour inférieur de petits trous qui plongent dans la dissolution. Cette galerie est destinée à contenir des cristaux de sulfate de cuivre qui se dissolvent à mesure que l'appareil fonctionne. Enfin, dans l'intérieur du cylindre C est un vase poreux ou diaphragme P, en terre de pipe dégourdie, plein d'eau acidulée avec de l'acide sulfurique, ou d'une dissolution de sel marin, dans laquelle plonge un cylindre de zinc Z, ouvert aux deux bouts et amalgamé. Aux cylindres zinc et cuivre sont fixées par des vis de pression deux lames minces de cuivre *p* et *n*, qui forment les électrodes de la pile.

Tant que les deux électrodes ne communiquent pas entre elles, la pile est inactive; mais aussitôt que la communication est établie, l'action chimique commence : l'acide sulfurique attaque le zinc, et produit ainsi un premier courant électrique; en outre, l'eau étant décomposée, tandis que son oxygène se porte sur le zinc, son hydrogène, réagissant sur la dissolution de sulfate de cuivre, s'empare de l'oxygène de l'oxyde du sel pour faire de l'eau, et révivifier le cuivre, qui va former, sur les parois du cylindre C, un dépôt sans adhérence. La dissolution de cuivre tend alors à s'appauvrir rapidement; mais les cristaux placés dans la galerie G se dissolvant au fur et à mesure, le degré de concentration de la dissolution reste constant. Quant à l'acide sulfurique rendu libre par la décomposition du sulfate de cuivre, il se porte, en même temps que l'oxygène de l'eau, vers le zinc pour le transformer en sulfate; et comme la quantité d'acide sulfurique mise en liberté dans la dissolution de cuivre est assez régulière, l'action de cet acide sur le zinc l'est aussi; d'où résulte un courant constant.

Fig. 443.

En résumé, on voit que, dans la pile de Daniell, le courant provient : 1° *de l'action de l'eau acidulée sur le zinc*; 2° *de la révivification de l'oxyde de cuivre par l'hydrogène qui résulte de la décomposition de l'eau*; cette double action donnant naissance à deux courants de même sens, et la seconde ayant pour effet de s'opposer à tout dépôt nuisible sur le cuivre des couples.

Avec cette pile, on obtient des effets constants pendant plusieurs

heures, et même pendant plusieurs jours, si on a soin de conserver la dissolution à l'état de saturation, en ajoutant de temps en temps des cristaux de sulfate de cuivre. Pour réunir plusieurs couples, on joint par des vis de pression le pôle zinc d'un couple avec le pôle cuivre du couple suivant, et ainsi de suite d'un couple à l'autre, comme le montre la figure 447, pour une autre espèce de pile. Quant à la nature des pôles, c'est l'électrode fixée au zinc qui est négative et l'électrode fixée au cuivre qui est positive, comme dans les piles déjà décrites.

Au lieu d'un vase de terre poreuse, on prend aussi, pour le diaphragme qui sépare les deux dissolutions, une poche de toile à voile ou de baudruche. L'effet est d'abord plus puissant qu'avec un vase poreux, mais les deux dissolutions se mélangent plus rapidement, ce qui l'affaiblit. En général, les diaphragmes doivent être perméables au courant, mais prévenir autant que possible le mélange des deux liquides.

Fig. 444.

Fig. 445.

629. **Pile de Grove.** — La figure 444 représente un couple de la pile de Grove. Ce couple se compose : 1° d'un vase de verre A, en partie rempli d'eau acidulée avec de l'acide sulfurique; 2° d'un cylindre de zinc Z, ouvert aux deux bouts et fendu dans toute sa longueur; 3° d'un vase poreux V, en terre de pipe peu cuite, et rempli d'acide azotique ordinaire; 4° d'une lame de platine P recourbée en S (fig. 445), et fixée à un couvercle *c* qui se pose sur le vase poreux. Une tige métallique *b*, communiquant avec la lame de platine, porte un fil de cuivre qui sert d'électrode positive, tandis qu'un second fil fixé au zinc sert d'électrode négative.

Cette pile est peu en usage, à cause du prix du platine. Ce métal présente en outre cet inconvénient que lorsque la pile a fonctionné un certain temps, il devient cassant et se brise par le plus petit effort.

630. **Pile de Bunsen.** — La *pile de Bunsen*, connue aussi sous la nom de *pile à charbon*, n'est autre chose que celle de Grove,

dont la feuille de platine est remplacée par un cylindre de charbon, préparé en calcinant, dans un moule de tôle, un mélange intime de coke et de houille grasse, bien pulvérisé et fortement tassé.

Chaque couple de la pile à charbon se compose de quatre pièces de forme cylindrique pouvant se placer facilement les unes dans les autres. Ces pièces sont : 1° un bocal F (fig. 446) de faïence ou de verre, plein d'une dissolution de 10 à 12 parties d'eau pour une partie d'acide sulfurique; 2° un cylindre creux Z, de zinc amalgamé, auquel est fixée une lame mince et étroite de cuivre destinée à servir d'électrode négative; 3° un vase poreux V, en terre de

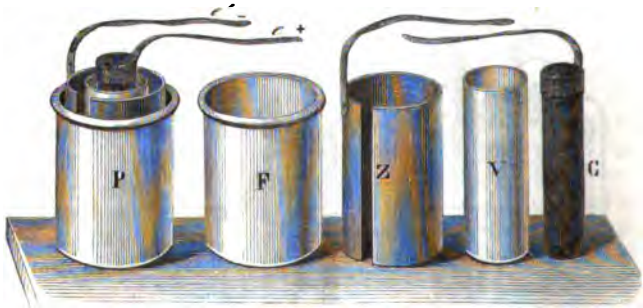


Fig. 446 (1 = 17).

pipe peu cuite, dans lequel on met de l'acide azotique ordinaire; 4° un cylindre de charbon C, préparé comme il a été dit ci-dessus, et bon conducteur. A la partie supérieure du charbon est fixée une lame de cuivre, servant d'électrode positive. La meilleure manière de fixer cette lame est de la souder à un cône qui entre dans le charbon comme le réprésente la figure 447. Quand on veut faire fonctionner l'appareil, on le dispose comme on le voit en P, en plaçant le cylindre de zinc dans le vase de faïence, puis dans ce cylindre le vase poreux et le charbon.

Tant que le zinc et le charbon ne communiquent pas, la pile est inactive; mais aussitôt que la communication est établie par un circuit conducteur, l'action chimique commence. L'eau dans laquelle plonge le zinc est décomposée par ce métal et par l'acide sulfurique, avec formation de sulfate de zinc. Quant à l'hydrogène mis en liberté, il se porte vers l'acide azotique du vase poreux et le décompose, en le transformant en acide hypo-azotique, dont une partie se dissout et l'autre se dégage. Dans ces diverses réactions, il se pro-

duit deux courants provenant, l'un de la décomposition de l'eau, l'autre de la décomposition de l'acide azotique. Ces deux courants qui sont de même sens, vont, dans le conducteur interpolaire, du charbon au zinc; c'est-à-dire que le pôle positif correspond au charbon et le pôle négatif au zinc.

Pour former un appareil composé, ou une pile, on dispose les couples comme le montre la figure 447. A chaque zinc est soudée

Fig. 447 (h = 17).

une lame de cuivre terminée par un cône de même métal qui s'engage fortement dans le charbon du couple suivant; enfin, le premier et le dernier couples se terminent par deux électrodes P et N. Dans des recherches récentes, M. Despretz a porté le nombre des couples jusqu'à 800.

La pile de Bunsen est la plus énergique des piles à courant constant et la plus employée aujourd'hui. Cependant, le courant s'affaiblit assez rapidement à mesure que l'acide sulfurique se combine au zinc. Cette pile a de plus l'inconvénient de répandre des vapeurs d'acide hypo-azotique tout à fait incommodes lorsque les couples sont un peu nombreux.

Pour varier la surface suivant les effets à produire, M. Deleuil construit des couples Bunsen de deux grandeurs, que nous distinguerons par les dénominations de *grands* et de *petits modèles*. Dans les premiers, le cylindre zinc a 22 centimètres de hauteur;

dans les derniers, 14. M. Deleuil admet que pour les effets qui dépendent de la surface, un couple grand modèle équivaut à environ deux couples du petit. Désormais, quand nous parlerons d'un nombre de couples, sans indication de modèle, il sera question du petit.

* 631. **Combinaisons diverses des couples d'une pile.** — Lorsqu'on réunit plusieurs couples de Bunsen ou de Daniell pour former une pile galvanique,

Fig. 448.

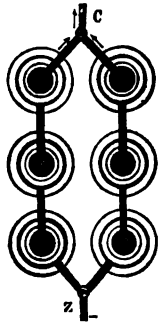


Fig. 449.

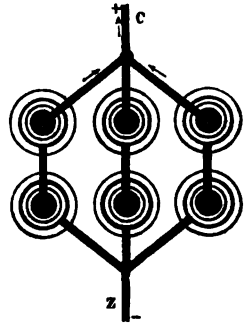


Fig 450.

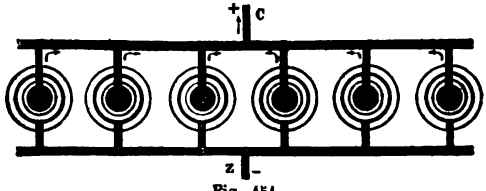


Fig. 451.

comme le montre la figure 447, on peut combiner ces couples de différentes manières. Par exemple, dans le cas de six couples seulement, on peut former les quatre combinaisons suivantes : 1° une seule série longitudinale (fig. 448), dont C représente l'électrode positive et Z l'électrode négative; 2° deux séries parallèles de trois couples chacune (fig. 449), les électrodes positives des deux séries se réunissant en C, et leurs électrodes négatives en Z; 3° trois séries parallèles de deux couples chacune (fig. 450), dont les électrodes de même nom vont encore concourir en une seule; 4° enfin, six séries d'un seul couple chacune (fig. 451), dont tous les courants se réunissent en C et en Z. Avec douze couples, on pourrait réaliser huit combinaisons différentes, et ainsi de suite à mesure qu'on prend un plus grand nombre de couples. Les combinaisons en

séries longitudinales (fig 448), et celles en deux ou trois séries parallèles (fig. 449 et 450) sont les plus fréquemment utilisées.

Dans ces diverses combinaisons, diminuer la longueur des séries pour en augmenter le nombre dans un rapport inverse, revient à diminuer le nombre des couples et à augmenter leur surface, ce qui conduit, pour un même nombre de couples, à des effets très-différents, comme on va le voir ci-après, en parlant des effets de la pile (633).

Dans les diverses combinaisons ci-dessus, la résistance que présente la pile au courant décroît à mesure que le nombre des séries parallèles augmente. En effet, si l'on représente par 1 la résistance d'un seul couple, celle de la première combinaison (fig. 448) est 6; dans la deuxième (fig. 449), elle est 3 pour chaque série, et par suite $\frac{3}{2} = 1,5$, pour les deux séries réunies, puisque, à résistance égale, le courant est doublé; de même dans la troisième combinaison (fig. 450), la résistance, pour chaque série, est 2, et pour les trois séries réunies $\frac{2}{3} = 0,666$; enfin, dans la quatrième (fig. 451), elle est $\frac{1}{6} = 0,166$. On calculerait de la même manière la résistance d'un nombre quelconque de couples disposés en séries parallèles. Par exemple, 24 couples, en 3 séries parallèles de 8, donnent la résistance $\frac{8}{3} = 2,666$. Or, comme le calcul démontre qu'on obtient le maximum d'effet d'une pile, quand la résistance, dans la pile, est égale à celle que présente le circuit que doit parcourir le courant d'une électrode à l'autre, on devra choisir, parmi les combinaisons possibles, celle dont la résistance s'approche le plus de la résistance du circuit donné.

* 632. **Propriété du zinc amalgamé.** — M. de La Rive a observé que le zinc parfaitement pur n'est pas attaquable par l'acide sulfurique étendu d'eau, mais le devient si on le met en contact avec une lame de platine ou de cuivre plongée dans la dissolution. Le zinc ordinaire, au contraire, qui n'est pas pur, est vivement attaqué par l'acide étendu; mais, amalgamé, il acquiert la propriété du zinc pur, et n'est attaqué qu'autant qu'il se trouve en contact avec un fil de cuivre ou de platine plongeant aussi dans la dissolution, c'est-à-dire qu'autant qu'il fait partie d'un couple en activité.

Cette propriété, qui paraît due à l'état électrique que prend le zinc par son contact avec le mercure, a été appliquée aux piles électriques par M. Kemp, qui, le premier, a imaginé d'amalgamer les zincs de chaque couple. Il résulte de cette amalgamation que tant que le circuit n'est pas fermé, c'est-à-dire tant qu'il n'y a pas courant, le zinc n'est pas attaqué. On observe, en outre, qu'avec le zinc amalgamé, le courant est plus régulier, et, en même temps, plus intense pour une même quantité de métal dissoute.

Pour amalgamer le zinc, on le plonge d'abord dans de l'eau acidulée avec de l'acide sulfurique, afin de le décaper, puis on le trempe dans le mercure pendant une minute environ. On le retire ensuite, et on laisse égoutter le mercure en excès.

CHAPITRE II.

EFFETS DE LA PILE, GALVANOPLASTIE, DORURE ET ARGENTURE.

633. **Divers effets de la pile.** — Les effets de l'électricité dynamique se divisent en effets physiologiques, physiques et chimiques. Ces effets diffèrent de ceux que présente l'électricité statique, en ce que ces derniers sont dus à une recomposition instantanée des deux électricités à forte tension, tandis que les premiers résultent de la recomposition lente et à tension beaucoup plus faible des mêmes fluides, lorsque les deux pôles de la pile sont réunis par un circuit plus ou moins conducteur. Par la continuité de la force qui les produit, les effets des courants sont beaucoup plus remarquables que ceux des machines électriques.

Les effets physiques, qui se divisent en effets calorifiques et en effets lumineux, dépendent surtout de la quantité d'électricité mise en mouvement dans la pile, et, par conséquent, de la surface des couples. Les effets chimiques, au contraire, ainsi que les effets physiologiques, dépendent de la tension, et, par conséquent, du nombre des couples (619). Tous ces effets augmentent avec l'action chimique du liquide de la pile.

634. **Effets physiologiques.** — On désigne sous ce nom les effets produits par la pile sur les animaux morts ou vivants. On a vu que ces effets furent les premiers observés, puisque c'est à eux qu'est due la découverte de l'électricité dynamique par Galvani. Ils consistent en commotions et en contractions musculaires très-énergiques quand les piles sont puissantes.

En prenant dans les deux mains les électrodes d'une forte pile, on ressent une commotion violente, comparable à celle de la bouteille de Leyde, surtout si les mains sont mouillées d'eau acidulée ou salée, qui augmente la conductibilité. La commotion est d'autant plus intense que les couples sont plus nombreux. Avec une pile de Bunsen de 50 à 60 couples, petit modèle, la commotion est forte; avec 150 à 200 couples, elle est insupportable et même dangereuse quand elle se prolonge. Elle se fait ressentir moins avant dans les bras que la commotion de la bouteille de Leyde, et, transmise par une chaîne de plusieurs personnes, elle n'est généralement ressentie que par celles qui sont plus rapprochées des pôles.

De même que celle de la bouteille de Leyde, la commotion de la pile est due à la recomposition des électricités contraires, mais avec cette différence que la décharge de la bouteille de Leyde étant instantanée, il en est de même de la commotion qui en résulte, tandis que la pile se rechargeant aussitôt après chaque décharge, les secousses se succèdent avec rapidité. L'effet du courant voltaïque sur les animaux varie avec sa direction. En effet, il résulte des recherches de M. Lehot et de M. Marianini, que lorsque le courant se propage suivant les ramifications des nerfs, il produit une contraction musculaire au moment où il commence, et une sensation douloureuse quand il finit; tandis que s'il se propage en sens contraire des ramifications nerveuses, il produit une sensation quand il subsiste, et une contraction au moment de son interruption. Toutefois, cette différence d'effets n'a réellement lieu que pour les courants faibles. Avec des courants intenses, les contractions et les douleurs ont également lieu à l'établissement et à la rupture du courant, quelle que soit sa direction.

Les contractions cessent aussitôt que le courant est établi invariablement entre le nerf et le muscle, ce qui tend à montrer qu'il s'est produit une modification instantanée qui subsiste autant que le courant. En effet, les contractions se manifestent de nouveau si on change la direction du courant, ou si on substitue à celui-ci un courant plus énergiqne.

Par l'effet du courant, des lapins asphyxiés depuis une demi-heure ont pu être rappelés à la vie; une tête de supplicié a éprouvé de si effroyables contractions, que les spectateurs fuyaient épouvantés. Le tronc, soumis à la même action, se soulevait en partie; les mains s'agitaient, frappaient les objets voisins, et les muscles pectoraux imitaient le mouvement respiratoire. Enfin, tous les actes de la vie se reproduisaient imparfaitement, mais cessaient instantanément avec le courant.

635. **Effets calorifiques.** — Un courant voltaïque qui traverse un fil métallique produit les mêmes effets que la décharge d'une batterie (610) : le fil s'échauffe, devient incandescent, fond ou se volatilise, selon qu'il est plus ou moins long et d'un diamètre plus ou moins fort. Avec une pile puissante, tous les métaux sont fondus, même l'iridium et le platine, qui résistent au feu de forge le plus intense. Le charbon est le seul corps qui n'ait pu être fondu jusqu'ici par la pile. Cependant, M. Despretz, avec une pile composée de 600 couples de Bunsen, réunis en six séries parallèles (631), a porté des baguettes de charbon très-pur à une température

telle qu'elles se sont courbées, ramollies et ont pu se souder ensemble; ce qui indique un commencement de fusion.

Dans les mêmes expériences, ce savant a transformé le diamant en graphite, et a obtenu, par une action assez prolongée, de petits globules de charbon fondu. Il a pu fondre en quelques minutes 250 grammes de platine; en n'opérant que sur quelques grammes, une partie a été volatilisée.

Il suffit d'une pile de 30 à 40 couples de Bunsen pour fondre et volatiliser avec rapidité des fils fins de plomb, d'étain, de zinc, de cuivre, d'or, d'argent, de fer et même de platine, avec de vives étincelles diversement colorées. Le fer et le platine brûlent avec une lumière d'un blanc éclatant; le plomb avec une lumière purpurine; celle de l'étain et celle de l'or sont d'un blanc bleuâtre; la lumière de zinc est mêlée de blanc et de rouge; enfin, le cuivre et l'argent donnent une lumière verte.

En faisant passer le courant dans des fils métalliques de même diamètre et de même longueur, mais de substance différente, Children a constaté que ce sont ceux dont la conductibilité électrique est moindre qui s'échauffent davantage; d'où l'on a conclu que les effets calorifiques de la pile sont dus à la résistance que rencontre le courant pour traverser le conducteur qui réunit les pôles.

On a déjà remarqué (633) que les effets calorifiques dépendent plus de la quantité du fluide électrique qui circule dans le courant que de la tension; en d'autres termes, ils dépendent plus de la surface des couples que de leur nombre. On parvient, en effet, à fondre un fil de fer avec un seul couple de Wollaston dont le zinc a 20 centimètres sur 15.

En plaçant, dans le courant, un fil métallique isolé dans un tube de verre plein d'eau, faisant l'office de calorimètre, M. Ed. Becquerel a trouvé que le dégagement de la chaleur par le passage de l'électricité au travers des corps solides, présente les lois suivantes :

1° *La quantité de chaleur dégagée est en raison directe du carré de la quantité d'électricité qui passe dans un temps donné;*

2° *Cette quantité de chaleur est en raison directe de la résistance du fil au passage de l'électricité;*

3° *Quelle que soit la longueur du fil, pourvu que son diamètre soit constant et qu'il passe la même quantité d'électricité, l'élévation de température est la même dans toute l'étendue du fil;*

4° *Pour une même quantité d'électricité, l'élévation de température, en différents points du fil, est en raison inverse de la quatrième puissance du diamètre.*

Les effets calorifiques des courants sont plus difficiles à observer dans les liquides, ces corps ayant un plus grand calorique spécifique que les solides, et les gaz qui se produisent absorbant une grande quantité de calorique latent. Par exemple, dans la décomposition de l'eau, on reconnaît que l'élévation de température est moindre au pôle négatif, où le volume d'hydrogène qui se dégage est double de celui de l'oxygène qu'on recueille au pôle positif, ainsi qu'on le verra bientôt (640).

366. **Effets lumineux.** — La pile électrique est, après le soleil, la source de lumière la plus intense que l'on connaisse. Ses effets lumineux se manifestent par des étincelles ou par l'incandescence des substances qui réunissent les deux pôles.

Pour obtenir des étincelles, lorsque la pile est assez puissante, on rapproche les deux électrodes, en laissant entre elles un petit intervalle, et on voit alors jaillir de vives étincelles qui peuvent se succéder assez rapidement pour produire une lumière continue. Avec huit ou dix couples Bunsen, on obtient de brillantes aigrettes lumineuses en faisant communiquer une des électrodes avec une râpe à bouchons, et en promenant l'autre sur les dents de la râpe. Si, dans cette expérience, on fait passer le courant dans la bobine d'un électro-aimant (fig. 492), les étincelles acquièrent une intensité remarquable; cet effet sera expliqué en parlant des phénomènes d'induction.

Par l'incandescence des conducteurs qu'ils traversent, les courants offrent des effets lumineux remarquables. Un fil de fer ou de platine, qui réunit les deux pôles d'une forte pile, et qui est assez gros pour n'être pas fondu, devient incandescent et jette un vif éclat tout le temps que la pile est en activité. Si le fil est enroulé sur lui-même en hélice, l'effet lumineux est augmenté.

Mais c'est surtout en faisant communiquer les deux électrodes avec deux cônes de charbon de coke bien calciné, comme le montre la figure 452, qu'on obtient un bel effet de lumière électrique. Le charbon *b* est fixe, tandis que le charbon *a* peut s'élever ou s'abaisser plus ou moins, à l'aide d'une crémaillère à laquelle il est fixé, et d'un pignon qu'on fait tourner à la main avec un bouton *c*. Les deux charbons étant d'abord mis en contact, on fait passer le courant: aussitôt le point de contact prend un éclat éblouissant qui s'étend peu à peu à une certaine distance des pointes de charbon. On peut

alors soulever le charbon supérieur sans que le courant soin interrompu ; les deux électricités se recomposant dans l'intervalle qui sépare les charbons, cet espace est occupé par un arc lumineux du plus vif éclat, qu'on nomme l'*arc voltaïque*.

La longueur de cet arc varie avec la force du courant. Il peut atteindre une longueur de 7 centimètres avec une pile de 600 couples

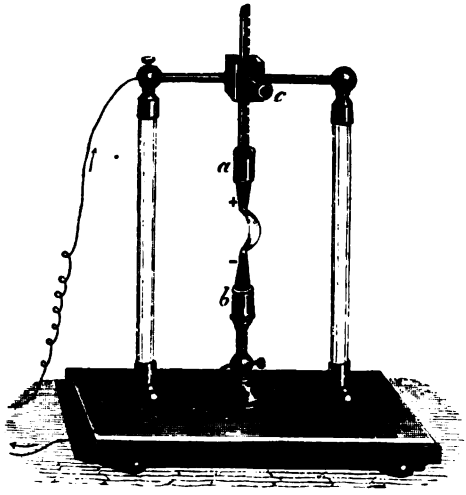


Fig. 452.

disposés en six séries parallèles, de 100 chacune, quand le charbon positif est en haut, comme dans la figure ci-dessus ; s'il est en bas, l'arc est plus court de près de 2 centimètres. L'arc voltaïque peut aussi se produire dans les liquides ; mais il est alors beaucoup moins long, et son éclat est bien diminué.

L'arc voltaïque jouit de la propriété, lorsqu'on lui présente un fort aimant, d'être dirigé par celui-ci, ce qui est une conséquence de l'action des aimants sur les courants (654).

Quelques physiciens ont regardé l'arc voltaïque comme formé d'une succession très-rapide de vives étincelles ; mais, en général, on admet qu'il est dû au courant électrique, qui est conduit du pôle positif au pôle négatif à l'aide de molécules incandescentes qui sont volatilisées et transportées dans le sens du courant, c'est-à-dire du pôle positif vers le pôle négatif. En effet, plus les électrodes sont

facilement désagrégées par le courant, plus on peut les écarter sans l'interrompre. Le charbon, qui est une substance très-friable, est un des corps qui donnent l'arc lumineux le plus long.

C'est Davy qui, le premier, à Londres, fit, en 1801, l'expérience de la lumière électrique à l'aide de deux cônes de charbon et d'une pile à auge de 2000 couples, dont les plaques avaient près de 11 centimètres de côté. Davy faisait usage de charbon de bois léger, éteint d'avance, à l'état incandescent, dans un bain de mercure,

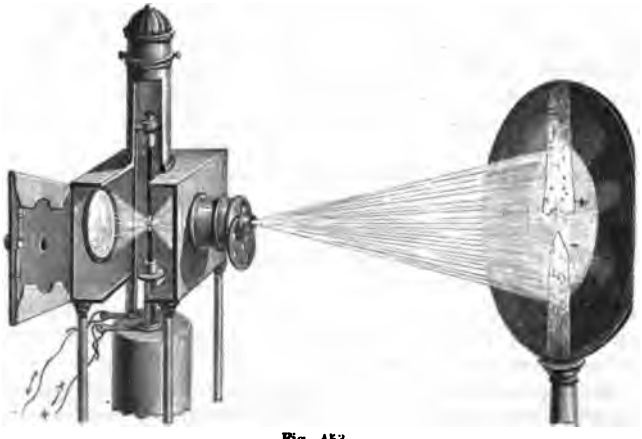


Fig. 453.

qui, en pénétrant dans les pores du charbon, en augmentait la conductibilité. Comme le charbon de bois brûle très-vite à l'air, on était obligé d'opérer dans le vide; c'est pourquoi l'expérience de la lumière électrique a longtemps été faite en plaçant les deux cônes de charbon dans un œuf électrique à robinet, comme celui représenté dans la figure 427. Aujourd'hui qu'on fait uniquement usage, dans ces expériences, de charbon de coke provenant des résidus des cornues à gaz, ce charbon, qui est dur et compacte et peut être taillé en baguettes, comme celles représentées en P et N dans la figure 454, ne brûle que lentement à l'air, ce qui dispense d'opérer dans le vide. Quand l'expérience se fait dans le vide, il n'y a pas combustion, mais les charbons s'usent encore, surtout le charbon positif, ce qui montre qu'il y a volatilisation et transport du charbon du pôle positif au pôle négatif.

* 637. **Expérience de M. Foucault.** — On doit à M. Foucault une jolie expérience qui consiste à projeter, à l'aide de lentilles, l'image des cônes de charbon représentés dans la figure 452, sur un écran, dans la chambre noire, au moment où la lumière électrique se produit (fig. 453). Cette expérience, qui se fait au moyen du microscope photo-électrique déjà décrit (fig. 331, page 458), met à même de distinguer très-bien les deux charbons incandescents, et on voit le charbon positif se creuser et diminuer, tandis que l'autre augmente. Quant aux globules représentés sur les deux charbons, ils proviennent de la fusion d'une petite quantité de silice contenue dans le coke dont ces charbons sont formés. Lorsque le courant commence à passer, c'est le charbon négatif qui devient lumineux le premier; mais c'est le charbon positif dont l'éclat est le plus intense : c'est aussi celui qui s'use le plus vite, c'est pourquoi il est convenable de le prendre un peu plus gros.

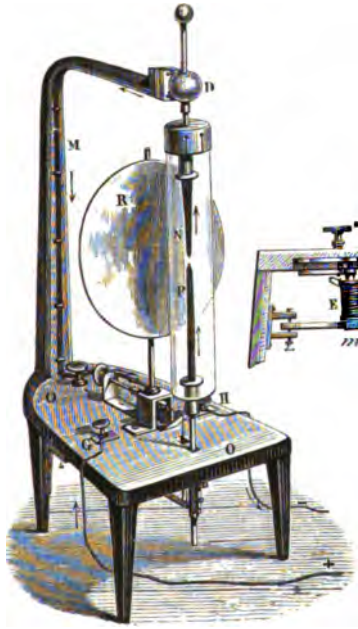
* 638. **Régulateur de la lumière électrique.** — Lorsqu'on veut appliquer la lumière électrique à l'éclairage, il importe qu'elle conserve la continuité d'éclat que présentent les autres systèmes d'éclairage. Or, il ne suffit pas pour cela que le courant de la pile soit constant, il faut encore que l'intervalle des charbons reste sensiblement invariable, ce qui exige qu'ils puissent se rapprocher à mesure qu'ils s'usent. Plusieurs appareils ont été proposés pour atteindre ce but; celui que nous allons décrire est dû à M. Deleuil.

Cet appareil se compose d'un trépied de fonte (fig. 454) sur lequel sont fixés les deux charbons et le régulateur qui les maintient à un intervalle constant. Le charbon négatif N est soutenu par une tige métallique qui glisse, à frottement doux, dans un support D, mais qui, une fois réglée, reste fixe. Quant au charbon positif P, il remonte successivement, par l'effet même du courant, à mesure que l'intervalle des charbons tend à augmenter.

On obtient ce résultat au moyen d'un régulateur fixé en dessous du trépied et représenté en coupe dans la figure 455. Un levier A, attaché par un bout à un ressort à boudin B, peut osciller sur un pivot L, mais seulement d'une très-petite quantité, étant maintenu à l'autre bout entre les pointes de deux vis qu'on règle de manière à lui laisser très-peu de jeu. Le levier A tend à tourner dans un sens par l'effet du ressort B, et dans l'autre par l'effet d'un *électro-aimant* E; cette pièce, qui sera décrite plus loin (fig. 492), consiste en un cylindre de fer doux entouré d'un fil de cuivre recouvert de soie, dans lequel passe le courant même qui se rend aux charbons. Ce cylindre ainsi disposé jouit de la propriété de devenir

un aimant puissant quand le courant passe dans le fil, mais qui s'affaiblit avec le courant et s'éteint avec lui. Enfin, une petite lame d'acier, fixée à l'extrémité B du levier, s'appuie en I sur de petites dents disposées en crémaillère le long de la tige K, qui porte le charbon positif P, et lui transmet le mouvement du levier.

Cela posé, lorsque le courant passe avec toute son intensité dans



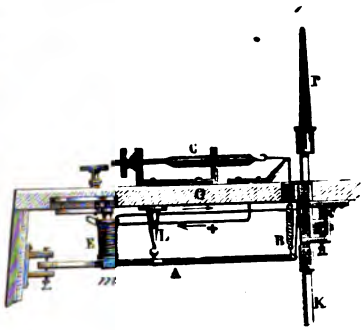


Fig. 454 Fig. 455.

le fil de l'électro-aimant, celui-ci attirant une armature de fer *m*, fixée au levier A, le bras du levier, à droite du pivot L, s'abaisse et entraîne la lame I, mais sans que celle-ci fasse descendre la tige K, dans les dents de laquelle la partie courbe de la lame n'engrène que pendant l'ascension. Au contraire, si, la distance des charbons augmentant, le courant s'affaiblit, l'électro-aimant ne pouvant plus faire équilibre au ressort B, le bras de levier qui s'est abaissé précédemment se relève actuellement et fait remonter la tige K d'un quart de millimètre par l'intermédiaire de la lame I. Les charbons une fois

rapprochés, le courant prend plus d'intensité et l'électro-aimant fonctionne de nouveau. La même série de mouvements se renouvelant périodiquement aussitôt que le courant tend à s'affaiblir, l'intensité reste sensiblement constante. La pièce C sert à régler le ressort B. Quant à la marche du courant, elle est suffisamment indiquée par les flèches tracées sur le dessin. Le tube de verre cylindrique qui enveloppe les charbons est destiné à les préserver des courants d'air qui les refroidiraient. En face des charbons est un réflecteur métallique R qui s'enlève à volonté.

L'appareil qui vient d'être décrit a éclairé, avec 50 couples Bunsen, nouveau système et grand modèle (630), les bains du Pont-Neuf pendant une partie de l'été de 1850, et la lumière était tellement intense qu'un plongeur pouvait ramasser une pièce de 50 centimes, la nuit, au fond de la Seine. Récemment, le même appareil a fonctionné pendant quatre mois consécutifs pour éclairer, le soir, les ouvriers qui travaillaient à la construction des docks Napoléon. Deux appareils, fonctionnant chacun avec 50 couples Bunsen, grand modèle, ont suffi pour éclairer 800 ouvriers, et la dépense s'est élevée, par soirée et par appareil, à 5 fr. de mercure, 4 fr. 50 de zinc, 1 fr. 40 de baguettes de charbon, 1 fr. 80 d'acide azotique et 1 fr. 85 d'acide sulfurique : total 14 fr. 55.

M. Foucault et ensuite M. Duboscq ont construit, pour la lumière électrique, des régulateurs dans lesquels les deux charbons sont mobiles. Par cette disposition, on parvient à donner une grande fixité au point lumineux, ce qui est nécessaire quand on veut appliquer la lumière électrique aux expériences d'optique.

639. **Propriétés et intensité de la lumière électrique.** — La lumière électrique détermine la combinaison d'un mélange de chlore et d'hydrogène, et agit sur le chlorure d'argent de même que la lumière du soleil.

Transmise au travers d'un prisme, la lumière électrique donne un spectre, de même que la lumière solaire (451); ce qui montre qu'elle n'est pas simple. Wollaston et surtout Fraünhofer ont trouvé que le spectre de la lumière électrique diffère de celui des autres lumières et de la lumière solaire par la présence de plusieurs raies très-claires, dont une, en particulier, qui se trouve dans le vert, est d'une clarté presque brillante en comparaison du reste du spectre. M. Wheatstone a observé qu'en se servant, pour électrodes, de différents métaux, le spectre et les raies sont modifiés; d'après M. Despretz les raies brillantes sont fixes et indépendantes de l'intensité du courant.

M. Masson, qui a étudié de nouveau la lumière électrique avec beaucoup de détail, en expérimentant sur la lumière de la machine électrique, sur celles de l'arc voltaïque et de la bobine de Ruhmkorff (695), a trouvé, dans le spectre électrique, les mêmes couleurs que dans le spectre solaire, mais traversées par des bandes lumineuses très-brillantes, de même teinte que celle de la couleur où elles sont placées; quant à la position de ces raies et à leur nombre, ils ne dépendent pas de l'intensité de la lumière, mais des substances entre lesquelles celle-ci éclate.

Avec le charbon, les raies sont remarquables par leur nombre et leur éclat; avec le zinc, le spectre est caractérisé par une teinte vert-pomme très-développée; avec l'argent, on a un vert très-intense; avec le plomb, c'est la teinte violette qui domine; et ainsi de suite avec les différents métaux.

Quant à l'intensité de la lumière électrique, M. Bunsen, en expérimentant avec 48 couples, et en éloignant les charbons de 7 millimètres, a trouvé qu'elle équivalait à celle de 572 bougies. Mais cette expérience a été faite avec des couples dans lesquels le charbon était extérieur et le zinc intérieur, et ces couples avaient des effets beaucoup moindres que ceux dans lesquels le charbon est intérieur (630). Par conséquent, la lumière de 48 de ces derniers couples équivaut à beaucoup plus de 572 bougies.

MM. Fizeau et Foucault, qui ont cherché à comparer la lumière électrique à la lumière solaire, n'ont pas comparé les quantites de lumière versées par ces deux sources, mais leurs effets chimiques sur l'iodure d'argent des plaques daguerriennes (474). Les résultats obtenus ne font donc pas connaître l'intensité optique de la lumière électrique, mais son intensité chimique.

En représentant par 1000 l'intensité de la lumière solaire à midi, MM. Fizeau et Foucault ont trouvé que celle de la lumière de 46 couples Bunsen (charbon intérieur), était représentée par 235, et celle de 80 couples, seulement par 238. Il résulte de ces nombres que l'intensité de la lumière ne croît pas d'une manière notable avec le nombre des couples; mais l'expérience démontre qu'elle s'accroît beaucoup avec leur surface. En effet, avec trois séries de 46 couples chacune, réunies parallèlement de manière que leurs pôles positifs concourent en un seul ainsi que leurs pôles négatifs, ce qui revient à tripler les surfaces (631), l'intensité a été 385, la pile fonctionnant depuis une heure; c'est plus du tiers de l'intensité de la lumière solaire.

M. Despretz, dans ses nombreuses expériences sur la pile, fait

observer qu'on ne peut trop se préserver de ses effets lumineux, lorsqu'ils sont portés à une certaine intensité. La lumière de 100 couples peut, dit-il, occasionner des maux d'yeux très-douloureux. Avec 600, un seul instant suffit pour que la lumière occasionne des maux de tête et d'yeux très-violents, et la figure est brûlée comme par un fort coup de soleil. C'est pourquoi il est indispensable, pendant ces expériences, de porter des lunettes à verres d'un bleu foncé.

640. **Effets chimiques, décomposition de l'eau, électrolytes.** — On a déjà remarqué que les effets chimiques de la pile dépendent plutôt du nombre des couples que de leur grandeur, parce que, dans les décompositions chimiques, l'action du courant s'exerçant sur des substances d'une faible conductibilité, il est nécessaire d'augmenter la tension, et, par conséquent, le nombre des couples.

Fig. 456 (h = 24).

La première décomposition opérée par la pile a été celle de l'eau, obtenue, en 1800, par deux Anglais, Carlisle et Nicolson, avec une pile à colonne. Il suffit de 4 ou 5 couples Bunsen pour décomposer l'eau avec rapidité; mais celle-ci doit contenir en dissolution un sel ou un acide qui augmente sa conductibilité; car si elle est pure, la décomposition ne se produit que fort lentement. La figure 456 représente l'appareil dont on se sert pour décomposer l'eau par la pile et recueillir l'oxygène et l'hydrogène qui se dégagent. Il se compose d'un vase conique, de verre, mastiqué dans un pied de bois. Du fond de ce vase s'élèvent deux fils de platine *h* et *n*, en communication avec deux vis de pression en cuivre, fixées sur les côtés de l'appareil et destinées à recevoir les électrodes de la pile. Après avoir rempli le vase d'eau légèrement acidulée, on pose sur les fils de platine deux petites cloches pleines d'eau; puis on établit le courant. Aussitôt l'eau est décomposée en oxygène et en hydrogène qui se dégagent en bulles dans les cloches. On vérifie alors que la cloche positive se remplit d'oxygène et la cloche négative d'hydrogène; de plus, le volume de ce dernier gaz est double

du premier. Cette expérience donne donc à la fois l'analyse qualitative et l'analyse quantitative de l'eau.

Les substances qui, comme l'eau, sont décomposées par le courant et dont les éléments sont complétement séparés, ont reçu de M. Faraday le nom d'*électrolytes*, et il a appelé *électrolysation*, ou *électrolyse*, le fait même de la décomposition par le courant voltaïque.

641. **Voltamètre, loi de Faraday.** — L'appareil employé ci-dessus pour la décomposition de l'eau (fig. 456) a reçu de M. Faraday le nom de *voltamètre*, parce qu'il l'a appliqué à la mesure de l'intensité des courants puissants de même que le galvanomètre sert à mesurer celle des courants faibles. L'emploi du voltamètre est fondé sur ce principe découvert par M. Faraday, que, dans les décompositions électro-chimiques, *la quantité, en poids, des éléments séparés est proportionnelle à la quantité d'électricité qui passe dans le courant*. Par conséquent, dans l'expérience ci-dessus, le volume des gaz recueillis peut servir à mesurer l'intensité chimique du courant.

Toutefois, il importe d'observer que la quantité de gaz qui se produit par la décomposition de l'eau ne dépend pas seulement de l'intensité du courant, mais encore du degré d'acidité de l'eau, de la nature, de la grandeur et de la distance des fils ou des lames qui plongent dans le liquide pour lui transmettre le courant. On doit donc avoir soin d'employer toujours le même appareil, ou des appareils entièrement semblables, sinon les résultats ne sont pas comparables.

Le voltamètre qu'on vient de décrire est un *voltamètre chimique;* on a aussi imaginé des *voltamètres calorifiques*, destinés à mesurer l'intensité des courants d'après la quantité de chaleur qu'ils dégagent dans les circuits solides ou liquides qu'ils parcourent. Mais tous ces voltamètres, tant chimiques que calorifiques, sont loin d'être des instruments de précision. Le meilleur de tous les instruments propres à comparer l'intensité des courants est celui qui sera décrit bientôt sous le nom de *galvanomètre*.

642. **Décomposition des oxydes métalliques et des acides.** — Les courants exercent sur les oxydes métalliques la même action que sur l'eau. Ils les réduisent tous, l'oxygène se rendant au pôle positif et le métal au pôle négatif. C'est à l'aide de courants très-puissants que Davy décomposa, le premier, en 1807, la potasse et la soude, et les ramena à la classe des oxydes métalliques. Jusqu'alors ces oxydes avaient résisté à tous les agents chimiques, et il en est

même encore, tels que la baryte, la strontiane et la chaux, qui n'ont pu être décomposés que par la pile.

Les oxacides sont décomposés de même que les oxydes, et toujours l'oxygène se porte au pôle positif et le radical au pôle négatif. Les hydracides sont aussi décomposés, mais leur radical se porte au pôle positif et l'hydrogene au pôle négatif.

En général, les composés binaires se comportent d'une manière analogue sous l'influence de la pile, l'un des éléments se rendant au pôle positif et l'autre au pôle négatif. Dans les décompositions ainsi opérées par la pile, les corps simples qui se portent vers le pôle positif ont reçu le nom de corps *électro-négatifs*, parce qu'on les a regardés comme chargés naturellement d'électricité négative, et ceux qui se portent au pôle négatif ont été appelés *électro-positifs*. L'oxygène, dans toutes ses combinaisons, est constamment électro-négatif, le potassium électro-positif. Les autres corps simples sont tantôt électro-positifs, tantôt électro-négatifs, suivant le corps auquel ils sont combinés. Le soufre, par exemple, qui est électro-positif avec l'oxygène, est électro-négatif avec l'hydrogène.

643. **Décomposition des sels.** — Les sels ternaires à l'état de dissolution sont tous décomposés par la pile, et présentent alors des effets qui varient avec les affinités chimiques et avec l'énergie des courants. Si l'acide et la base du sel sont stables, ils sont simplement séparés, et alors l'acide se rend toujours au pôle positif, et l'oxyde au pôle négatif; c'est ce qui a lieu avec les sulfates, les carbonates et les phosphates des métaux des deux premières sections. Si l'acide est peu stable, il est décomposé et son oxygène se rend seul au pôle positif. Avec un oxyde faible, le métal réduit va seul au pôle négatif, tandis que l'acide et l'oxygène de l'oxyde se portent au pôle positif : c'est ce qu'on observe dans les sels de plomb, de cuivre, d'argent, et, en général, avec les sels des trois dernières sections. Enfin, l'acide et l'oxyde sont complétement réduits tous les deux; dans ce cas, leur oxygène apparaît tout entier au pôle positif et les deux radicaux à l'autre pôle.

On démontre la décomposition des sels par la pile avec un tube de verre recourbé (fig. 457), dans lequel on verse une dissolution de sulfate de potasse ou de soude, colorée en bleu avec du sirop de violette. Ayant plongé, dans les branches du tube, deux lames de platine, on met celles-ci en communication avec les électrodes de la pile. Au bout de quelques minutes, si l'on fait usage de trois ou quatre couples Bunsen, on remarque que la branche positive A

se colore en rouge, et la branche négative B en vert, ce qui montre que l'acide du sel s'est porté au pôle positif, et la base au pôle négatif: car on sait que le sirop de violette a la propriété de rougir par l'action des acides, et de verdir par celle des bases.

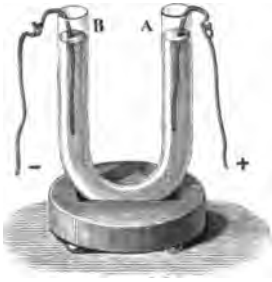


Fig. 457 (h = 12).

Dans cette expérience, si le courant est un peu intense, outre la décomposition du sel, on remarque un dégagement d'oxygène au pôle positif, et d'hydrogène au pôle négatif, ce qui indique qu'il y a aussi décomposition de l'eau par le courant; ou ce qu'on peut encore expliquer en admettant que l'oxyde de potassium ou de sodium étant décomposé, son oxygène se porte au pôle positif, tandis que le métal réagissant sur l'eau s'empare de son oxygène et met l'hydrogène en liberté.

La décomposition des sels par la pile a reçu d'importantes applications dans la galvanoplastie, la dorure et l'argenture, opérations qui sont décrites ci-après (646).

* 644. **Anneaux de Nobili.** — En décomposant les sels par la pile, Nobili a obtenu, sur des plaques métalliques, des anneaux colorés de teintes extrêmement brillantes. Ces anneaux résultant de couches métalliques très-minces qui se déposent sur les plaques, leur coloration s'explique par la théorie des anneaux colorés de Newton (514). Pour les obtenir, on place, au fond d'une dissolution d'acétate de plomb ou de sulfate de cuivre, une plaque métallique communiquant avec le pôle négatif d'une pile faible; puis on ferme le courant avec un fil de platine qui communique avec le pôle positif, et plonge dans la dissolution perpendiculairement à la plaque, de manière à en approcher de très-près. Il se dépose alors, en regard de la pointe, des anneaux doués d'une coloration très-vive, qui varie avec le sel en dissolution et avec la nature des plaques.

* 645. **Arbre de Saturne.** — Quand on plonge, dans une dissolution saline, un métal plus oxydable que celui du sel, le métal de ce dernier est précipité par celui qu'on a immergé, et se dépose sur lui lentement, tandis que le métal immergé se substitue, équivalent pour équivalent, au métal du sel. Cette précipitation d'un métal par un autre est attribuée en partie aux affinités, en partie à l'action électro-chimique d'un courant qui serait dû au contact du métal

précipité et du métal précipitant; ou plutôt à l'action de l'acide contenu dans la dissolution, car on a reconnu qu'il est nécessaire que cette dernière soit légèrement acide. L'excès d'acide libre agit alors sur le métal précipitant et détermine le courant qui décompose le sel.

Un effet remarquable de la précipitation d'un métal par un autre est l'*arbre de Saturne*. On nomme ainsi une suite de ramifications brillantes qu'on obtient par le zinc dans les dissolutions d'acétate de plomb. Pour cela, on remplit un bocal de verre d'une dissolution bien limpide de ce sel, puis on ferme le vase avec un bouchon de liége, auquel est fixé un morceau de zinc en contact avec des fils de laiton qui plongent, en divergeant, dans la dissolution. Le bocal étant hermétiquement clos, on l'abandonne à lui-même. Au bout de quelques jours, de brillantes paillettes de plomb cristallisé se déposent sur les fils de laiton, et simulent une végétation qu'on a désignée sous le nom d'*arbre de Saturne*, du nom que les anciens alchimistes donnaient au plomb. On a de même donné le nom d'*arbre de Diane* au dépôt métallique produit par le mercure dans le nitrate d'argent.

GALVANOPLASTIE, DORURE ET ARGENTURE.

646. **Galvanoplastie.** — La décomposition des sels par la pile a reçu une importante application dans la *galvanoplastie :* on nomme ainsi l'art de modeler les métaux en les précipitant de leurs dissolutions salines par l'action lente d'un courant électrique. Cet art était inventé à peu près simultanément par M. Spencer, en Angleterre, et par M. Jacobi, en Russie, dans l'année 1838.

Lorsqu'on veut reproduire une médaille ou tout autre objet par la galvanoplastie, il faut d'abord s'en procurer une empreinte en creux, sur laquelle puisse se déposer la couche métallique qui doit reproduire en relief la médaille. Si celle-ci est en métal, le procédé le plus simple pour former le moule est de faire usage de l'alliage fusible de d'Arcet, composé de 5 parties de plomb, 8 de bismuth et 3 d'étain. On verse cet alliage fondu dans une soucoupe peu profonde, et au moment où il va commencer à se solidifier, on laisse tomber la médaille à plat, d'une petite hauteur, en ayant soin de lui conserver ensuite une complète immobilité. Quand l'alliage est refroidi, il suffit de lui donner un léger choc pour que la médaille s'en détache. On entoure alors le moule d'un fil de cuivre destiné

à le mettre en communication avec le pôle négatif de la pile, puis on recouvre son contour et sa face postérieure d'une faible couche de cire fondue, afin que le dépôt métallique ne se précipite que sur l'empreinte même.

Cela posé, pour reproduire en cuivre une médaille, on prend une cuve remplie d'une dissolution saturée de sulfate de cuivre, et, ayant posé dessus deux baguettes de laiton B et D (fig. 458), communiquant l'une au pôle négatif et l'autre au pôle positif d'un couple Bunsen, on suspend à la première le moule *m*, qu'on a pré-

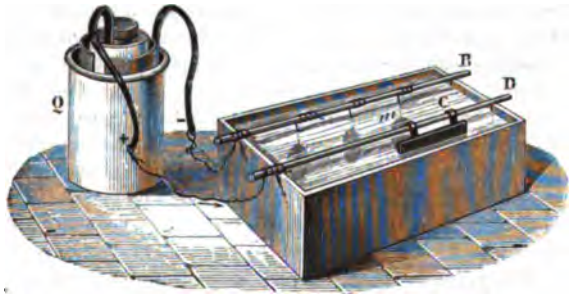


Fig. 458.

paré, et à l'autre une plaque de cuivre rouge C. Le courant se trouvant ainsi fermé, le sulfate de cuivre est décomposé; son acide et l'oxygène de l'oxyde se rendent au pôle positif, tandis que le cuivre seul se rend au pôle négatif, en se déposant lentement sur le moule suspendu à la tige B; on peut même ainsi suspendre plusieurs moules à la fois. Au bout de quarante-huit heures, le moule est recouvert d'une couche de cuivre solide et résistante, mais non adhérente. Cependant, pour empêcher complétement l'adhérence, on doit, avant l'opération, brosser le moule avec une brosse fine, passée très-légèrement sur un corps gras, ou le flamber rapidement sur une flamme résineuse pour y faire un dépôt de matière étrangère.

Si la médaille à reproduire est en plâtre, on ne peut en faire le moule en alliage de d'Arcet. Alors on la plonge dans un bain de stéarine fondue, à 70 degrés; retirant aussitôt la médaille, elle se dessèche presque instantanément, ce qui provient de ce que la stéarine pénètre dans les pores du plâtre. Ce dernier une fois refroidi, on l'enduit de plombagine en le frottant avec une brosse

douce, imprégnée de cette substance, puis on l'entoure d'une bande de carton, et on coule dessus de la stéarine tiédé; celle-ci, en se solidifiant, reproduit fidèlement, en creux, la médaille primitive. Le moule ainsi formé n'étant point adhérent au plâtre, à cause de la couche de plombagine déposée dessus, on l'enlève, puis on l'enduit à son tour de plombagine, afin de le rendre conducteur. C'est ensuite ce moule ainsi préparé qu'on suspend, par un fil de cuivre, au pôle négatif de la pile, comme ci-dessus.

On fait aussi de très-bons moules avec la gutta-percha. Pour cela, on commence par recouvrir de plombagine l'objet dont on veut prendre l'empreinte, afin qu'il n'adhère pas à la gutta-percha. Puis, ayant chauffé, dans l'eau chaude, une certaine quantité de cette substance jusqu'à ramollissement, on applique dessus la pièce à reproduire, en ayant soin de la soumettre à une pression un peu forte. Laissant ensuite refroidir, on détache la gutta-percha qui est peu adhérente, et on a alors, sur cette substance, une empreinte, en creux, très-fidèle de l'objet. Il reste à enduire cette empreinte de plombagine pour la rendre conductrice, comme on l'a fait ci-dessus pour la stéarine. Si l'on suspend ensuite au pôle négatif de la pile, dans une dissolution concentrée de sulfate de cuivre, l'empreinte ainsi préparée, on a, au bout de quarante-huit heures, une reproduction en cuivre de l'objet.

La plaque de cuivre rouge C, placée au pôle positif, n'a pas seulement pour but de fermer le courant, elle sert aussi à entretenir la dissolution dans un état de concentration constant; en effet, l'acide et l'oxygène qui se rendent au pôle positif se combinent au cuivre de la plaque, et reproduisent constamment une quantité de sulfate de cuivre égale à celle qui a été décomposée par le courant.

Pour la galvanoplastie, on préfère, en général, la pile de Daniell (628), à cause de l'uniformité de son effet; mais on opère aussi très-bien avec un seul couple Bunsen, surtout avec l'ancien modèle, qui est plus faible; seulement, on doit aciduler fort peu l'eau dans laquelle plonge le zinc.

647. **Dorure galvanique.** — Avant de connaître la décomposition des sels par la pile, on dorait au moyen du mercure. Pour cela, on amalgamait ce métal avec l'or, puis on appliquait l'amalgame sur la pièce à dorer. En portant ensuite les objets ainsi recouverts, dans un four, pour en élever la température, le mercure se volatilisait et l'or seul restait sous forme d'une couche très-mince sur les objets dorés. Le même procédé était appliqué à l'argenture; mais à ce procédé, qui est coûteux et insalubre, on substitue généra-

lement aujourd'hui la dorure et l'argenture galvaniques. La dorure par la pile ne diffère de la galvanoplastie qu'en ce que la couche métallique qu'on fait déposer sur les objets à dorer est beaucoup plus mince et plus adhérente. Brugnatelli, élève de Volta, paraît être le premier, en 1803, qui ait observé qu'on pouvait dorer avec une pile et une dissolution alcaline d'or; mais c'est M. de La Rive qui, le premier, appliqua réellement la pile à la dorure. Les procédés de dorure et d'argenture furent ensuite perfectionnés par MM. Elkington, Ruolz et autres physiciens.

Les pièces à dorer doivent subir trois préparations, qui sont le *recuit*, le *dérochage* et le *décapage*.

Le recuit consiste à chauffer les pièces pour leur enlever les matières grasses dont elles ont pu être imprégnées dans les travaux auxquels elles ont été soumises antérieurement.

Les pièces à dorer étant ordinairement en cuivre, leur surface, pendant le recuit, s'est recouverte d'une couche de protoxyde et de bioxyde de cuivre que le dérochage a pour but d'enlever. Pour cela, on plonge les pièces encore chaudes dans un bain d'acide azotique très-étendu d'eau, où on les laisse assez longtemps pour que l'oxyde se détache. On les frotte alors avec une brosse dure, on les lave à l'eau distillée, et on les fait sécher dans de la sciure de bois légèrement chauffée.

Les pièces sont encore irisées; pour enlever toutes les taches, il reste le décapage, opération qui consiste à plonger rapidement les pièces dans un bain d'acide nitrique ordinaire, puis dans un mélange du même acide, de sel marin et de suie, et enfin à laver dans l'eau pure.

Les pièces une fois préparées, on les suspend à l'électrode négative d'une pile formée de trois ou quatre couples de Daniell ou de Bunsen, et on les plonge dans un bain d'or, en les disposant comme pour la galvanoplastie (fig. 458). Elles restent dans le bain plus ou moins longtemps, suivant l'épaisseur qu'on veut donner au dépôt.

On a beaucoup varié la composition des bains. Celui qui est le plus en usage se compose de 1 gramme de chlorure d'or et 10 grammes de cyanure de potassium dissous dans 200 grammes d'eau. Pour entretenir le bain à un degré de concentration constant, on suspend à l'électrode positive une lame d'or qui se dissout à mesure que le bain laisse déposer son or sur les pièces en communication avec le pôle négatif.

Le procédé qui vient d'être décrit s'applique très-bien pour dorer non-seulement le cuivre, mais l'argent, le bronze, le laiton, le mail-

lechor. Quant aux autres métaux, comme le fer, l'acier, le zinc, l'étain, le plomb, ils se dorent mal. Pour obtenir une bonne dorure, on est obligé de les recouvrir d'abord d'une couche de cuivre, au moyen de la pile et d'un bain de sulfate de cuivre; c'est ensuite le cuivre qui les recouvre qu'on dore comme ci-dessus.

648. **Argenture.** — Tout ce qu'on vient de lire sur la dorure galvanique s'applique exactement à l'argenture; il n'y a de différence que dans la composition du bain, qui est formé de 2 grammes de cyanure d'argent et 10 grammes de cyanure de potassium dissous dans 250 grammes d'eau. A l'électrode positive est suspendue une plaque d'argent qui empêche le bain de s'appauvrir, et à l'électrode négative sont les pièces à argenter, bien décapées.

CHAPITRE III

ÉLECTRO-MAGNÉTISME, GALVANOMÉTRIE.

649. **Expérience d'Œrsted.** — Œrsted, professeur de physique à Copenhague, fit connaître, en 1819, une découverte qui liait intimement désormais le magnétisme et l'électricité, et qui fut bientôt, entre les mains d'Ampère et de M. Faraday, la source d'une branche nouvelle de la physique. Le fait découvert par Œrsted est l'action directrice qu'un courant fixe exerce, à distance, sur une aiguille aimantée mobile. Bientôt après on a reconnu que, réciproquement, un aimant fixe a une action directrice sur un courant mobile, et on a donné le nom d'*électro-magnétisme* à la partie de la physique qui traite des actions mutuelles qui s'exercent entre les aimants et les courants.

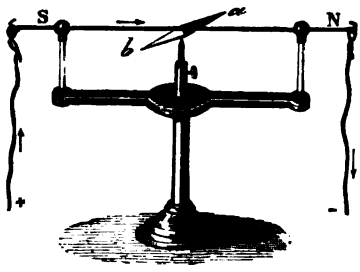


Fig. 459 (h = 21).

Pour faire l'expérience d'Œrsted, on tend horizontalement, dans la direction du méridien magnétique, un fil de cuivre, au-dessus d'une aiguille aimantée mobile, comme le représente la figure 459. Tant que le fil n'est point traversé par un courant, l'aiguille lui demeure parallèle; mais aussitôt que les extrémités du fil sont

mises en communication avec les électrodes d'une pile, *l'aiguille est déviée et tend d'autant plus à prendre une direction perpendiculaire au courant, que celui-ci est plus intense.*

Quant au sens dans lequel les pôles sont déviés, il se présente plusieurs cas, qui vont se ramener tout à l'heure à un principe unique. Rappelons d'abord la convention déjà établie (620), que l'on conçoit toujours le courant allant, dans le fil conjonctif, du pôle positif au pôle négatif. Cela posé, l'expérience précédente présente les quatre cas suivants :

1° Si le courant passe au-dessus de l'aiguille et va du sud au nord, le pôle austral est dévié vers l'ouest : c'est cette disposition qui est représentée dans le dessin ci-contre; 2° si le courant passe au-dessous de l'aiguille, toujours du sud au nord, le pôle austral est dévié à l'est; 3° lorsque le courant passe au-dessus de l'aiguille, dans la direction du nord au sud, le pôle austral se dirige vers l'est; 4° enfin, la déviation a lieu vers l'ouest quand le courant va encore du nord au sud, au-dessous de l'aiguille.

Si l'on conçoit, comme l'a fait Ampère, un observateur placé dans le fil conjonctif, de manière que le courant entrant par les pieds sorte par la tête, et que la face soit constamment dirigée vers l'aiguille, on reconnaît facilement que, dans les quatre positions qu'on vient de considérer, le pôle austral est dévié vers la gauche de l'observateur. Le courant ainsi personnifié, on peut donc résumer les différents cas considérés ci-dessus dans l'énoncé de ce principe général : *Dans l'action directrice des courants sur les aimants, le pôle austral est constamment dévié vers la gauche du courant.*

650. **Galvanomètre ou multiplicateur.** — On nomme *galvanomètre*, *multiplicateur* ou *rhéomètre*, un appareil extrêmement sensible qui sert à constater l'existence, le sens et l'intensité des courants. Cet appareil fut imaginé par Schweigger, en Allemagne, peu de temps après la découverte d'Œrsted.

Pour en comprendre le principe, considérons une aiguille aimantée suspendue à un fil de soie sans torsion (fig. 460), et entourée, dans le plan du méridien magnétique, d'un fil de cuivre formant un circuit complet autour de l'aiguille, dans le sens de sa longueur. Lorsque ce fil est traversé par un courant, il résulte de la convention établie dans le paragraphe précédent que, dans toutes les parties du circuit, un observateur couché suivant le fil, dans le sens des flèches, et regardant l'aiguille *ab*, aurait la gauche tournée vers le même point de l'horizon, et, par conséquent, que partout

l'action du courant tend à tourner l'aiguille dans le même sens. C'est-à-dire que les actions des quatre branches du circuit concourent pour donner au pôle austral la même direction. En enroulant le fil de cuivre dans le sens de l'aiguille, comme le représente la figure, on a donc *multiplié* l'action du courant. Si au lieu d'un seul circuit on en fait plusieurs, l'action se multiplie davantage et la déviation de l'aiguille augmente. Cependant, on ne multiplierait pas indéfiniment l'action du courant en continuant les circonvolutions du fil, car on verra bientôt que l'intensité d'un courant s'affaiblit lorsque la longueur du circuit qu'il parcourt augmente.

Comme l'action directrice de la terre tend sans cesse à maintenir l'aiguille dans le méridien magnétique, et s'oppose ainsi à l'action du courant, on rend l'effet de celui-ci beaucoup plus sensible, en

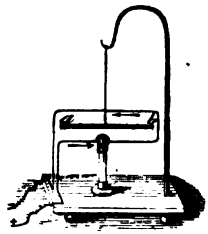


Fig. 460.

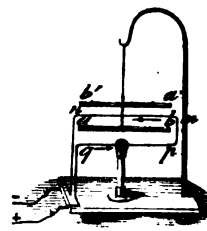


Fig. 461.

faisant usage d'un système de deux aiguilles astatiques, comme le montre la figure 461. L'action de la terre sur les aiguilles est alors très-faible (553), et de plus les actions du courant sur les deux aiguilles s'ajoutent. En effet, l'action du circuit complet tend, d'après le sens du courant marqué par les flèches, à diriger vers l'ouest le pôle austral de l'aiguille inférieure *ab*. Quant à l'aiguille supérieure *a'b'*, elle est soumise à l'action de deux courants contraires *mn* et *qp*; mais le premier étant plus rapproché, c'est son action qui l'emporte. Or, ce courant, passant au-dessous de l'aiguille, du pôle austral au pôle boréal, tend évidemment à tourner le pôle *a'* vers l'est et, par conséquent, le pôle *b'* vert l'ouest, c'est-à-dire dans le même sens que le pôle *a* de l'autre aiguille.

Ces principes posés, il est facile de se rendre compte de la théorie du *multiplicateur*. Cet appareil, représenté dans la figure 462, se compose d'un cadre D, de cuivre rouge, autour duquel s'enroule un fil de même métal, recouvert de soie dans toute sa longueur, afin d'isoler les circuits les uns des autres. Au-dessus de ce cadre

est un cadran horizontal gradué, dont le zéro correspond au diamètre parallèle à la direction du fil de cuivre sous le cadran; ce cadran porte deux graduations, l'une à droite, l'autre à gauche du zéro, mais seulement jusqu'à 90 degrés. Au moyen d'un support et d'un fil de cocon extrêmement fin, est suspendu un système astatique (553) formé de deux aiguilles à coudre *ab* et A, la première au-dessus du cadran, la seconde dans le circuit même. Ces aiguilles, qui sont réunies entre elles par un fil de cuivre, comme celles de la figure 382 (page 545), et ne peuvent être déviées l'une sans l'autre, ne doivent pas avoir identiquement la même intensité magnétique, sinon tout courant, fort ou faible, les mettrait toujours en croix avec lui.

Fig. 462 (h = 29).

Les tiges recourbées K et H, qui communiquent, au-dessous de l'appareil, avec les deux bouts du circuit, sont destinées à recevoir les conducteurs qui transmettent le courant qu'on veut observer. Les vis calantes C servent à placer l'appareil bien verticalement, de manière que le fil de suspension corresponde exactement au centre du cadran. Enfin, un bouton E transmet le mouvement au cadre D et au cadran, qui sont mobiles autour d'un axe vertical, de manière à amener les fils du circuit dans la direction du méridien magnétique, sans déplacer l'appareil.

Lorsque le galvanomètre est destiné à observer des courants dus aux actions chimiques, le fil qui s'enroule autour des aiguilles doit être d'un très-petit diamètre, et faire un grand nombre de révolutions, 600 à 800 au moins. Le nombre des tours s'élève même souvent à deux ou trois mille, et pour des expériences très-délicates il

a été porté jusqu'à 30000. Pour les courants thermo-électriques, qui seront décrits plus loin, le fil doit être plus gros et faire un nombre de tours beaucoup moindre, deux ou trois cents seulement. Enfin, lorsqu'il s'agit de courants intenses, on fait usage de galvanomètres à une seule aiguille, et on ne fait faire au fil qu'un très-petit nombre de tours, même un seul. Le galvanomètre le plus simple est alors une boussole au-dessus de laquelle passe un fil de cuivre dirigé dans le sens du méridien magnétique, et dans lequel passe le courant dont on cherche l'intensité.

Le galvanomètre qui vient d'être décrit n'accuse aucun courant lorsqu'on fait passer dans le fil l'électricité d'une machine électrique, en mettant en communication l'un des bouts avec les conducteurs et l'autre avec le sol. On ne rend sensible le courant qui passe alors dans l'appareil qu'en faisant usage d'un fil très-fin, enroulé jusqu'à deux ou trois mille fois sur lui-même, et en isolant les circuits complétement les uns des autres à l'aide de soie et de vernis à la gomme laque. Avec ces conditions, les aiguilles sont déviées par l'électricité de la machine électrique, ce qui montre l'identité de l'électricité statique avec l'électricité dynamique.

651. **Graduation du galvanomètre.** — Le galvanomètre, tel qu'il vient d'être décrit, est un appareil extrêmement sensible pour constater la présence des courants, mais il ne fait pas connaître leur intensité. Pour le faire servir à cet usage, il faut construire des tables, au moyen desquelles on puisse déduire, de la déviation de l'aiguille, l'intensité du courant.

La méthode la plus simple pour former ces tables est celle du *multiplicateur à deux fils*. On enroule simultanément, sur le cadre de l'appareil, deux fils de cuivre recouverts également de soie, et identiques en longueur et en diamètre; puis, choisissant une source d'électricité dynamique constante, mais très-faible, on fait passer le courant dans un des fils, ce qui donne une certaine déviation, 5 degrés, par exemple. Ensuite, à l'aide d'une source électrique identique avec la première, on fait passer, en même temps, dans chaque fil, un courant de même intensité; on obtient alors une certaine déviation, 10 degrés, par exemple, qui est due à l'action simultanée des deux courants, ou, ce qui est la même chose, à un courant double du premier en intensité. Si l'on fait ensuite passer dans un des fils un courant capable de produire seul la déviation 10, et dans l'autre un des courants qui ont produit la déviation 5, ce qui revient évidemment à un courant triple

du premier, on obtient la déviation 15. Enfin, faisant passer dans chacun des fils, à la fois, un courant capable de donner la déviation 10, on en observe une de 20 degrés. C'est-à-dire que *jusqu'à 20 degrés les déviations croissent proportionnellement à l'intensité du courant*. Au delà, elles croissent moins vite; mais, par le même procédé, on continue à déterminer, de distance en distance, les déviations correspondantes à des intensités connues, puis on achève ensuite la table par la méthode des interpolations : chaque galvanomètre exige une table particulière, car la relation entre l'intensité du courant et la déviation de l'aiguille varie avec le degré d'aimantation de celle-ci, avec sa longueur, avec sa distance du courant, et enfin avec la longueur du circuit.

Puisqu'on a vu ci-dessus que, jusqu'à 20°, les déviations sont sensiblement proportionnelles aux intensités, on peut, dans le cas d'un galvanomètre à un seul fil, s'appuyer sur cette propriété pour mesurer jusqu'à cette limite, les intensités au moyen des déviations. Au delà, il faudrait construire une table, en se fondant sur les déviations produites par des courants dont l'intensité serait connue, et en calculant ensuite, par interpolation, les intensités correspondantes aux déviations intermédiaires.

Le multiplicateur à deux fils peut aussi servir à mesurer la différence d'intensité de deux courants; ce qui s'obtient en faisant passer simultanément, en sens contraire, un courant dans chaque fil. L'appareil prend alors le nom de *galvanomètre différentiel*.

652. **Usages du galvanomètre.** — Par son extrême sensibilité, le galvanomètre est un des instruments les plus précieux de la physique. Il ne sert pas seulement à constater la présence des courants les plus faibles, mais il fait connaître leur direction et leur intensité. C'est avec cet appareil que M. Becquerel a pu constater qu'il y a dégagement d'électricité dans toutes les combinaisons chimiques, et déterminer les lois qui régissent ces combinaisons.

Par exemple, si l'on fixe aux extrémités du circuit du galvanomètre deux fils de platine, et si on plonge ceux-ci dans une capsule remplie d'acide azotique, on ne remarque aucune déviation de l'aiguille, ce qu'il était facile de prévoir puisque le platine n'est pas attaqué par l'acide azotique. Mais si l'on verse une goutte d'acide chlorhydrique près d'un des fils immergés, aussitôt l'aiguille du galvanomètre est déviée, ce qui indique que le circuit est traversé par un courant. En effet, on sait que par leur réaction mutuelle les acides azotique et chlorhydrique donnent naissance à

de l'acide chloro-azotique, ou *eau régale*, qui attaque le platine On reconnaît de plus, par le sens de la déviation, que le platine est électrisé négativement et l'acide positivement.

653. **Lois des actions des courants sur les aimants.** — Les actions que les courants exercent sur les aimants sont de deux sortes. l'une directrice, l'autre attractive ou répulsive. On sait déjà (649) que l'action directrice d'un courant sur un aimant consiste en ce que *le courant tend toujours à mettre l'aimant en croix avec lui, son pôle austral à gauche d'un observateur qui serait couché dans le courant, de manière que, regardant l'aimant, le courant entre par les pieds et sorte par la tête.*

L'intensité de l'action directrice des courants sur l'aiguille aimantée varie avec la distance. D'après le nombre d'oscillations que fait l'aiguille à des distances inégales, sous l'influence d'un courant rectiligne, Savart et M. Biot ont trouvé que *l'intensité de la résultante des actions directrices de toutes les parties du courant sur l'aiguille, est en raison inverse de la simple distance.*

Quant à l'action attractive ou répulsive des courants sur les aimants, on la constate en suspendant verticalement, par une de ses extrémités, une aiguille à coudre aimantée, à un fil de soie très-fin. Puis, on fait passer un courant horizontal très-près de cette aiguille. On observe alors, suivant le sens du courant, des attractions ou des répulsions qui s'expliquent par l'action des courants sur les solénoïdes, lorsque l'on compare les aimants à des solénoïdes, comme l'a fait Ampère, dans une théorie que nous ferons bientôt connaître (672).

ACTIONS DES AIMANTS ET DE LA TERRE SUR LES COURANTS.

654. **Action directrice des aimants sur les courants.** — L'action directrice entre les courants et les aimants est réciproque. Dans l'expérience d'Œrsted (fig. 459), l'aiguille aimantée étant mobile, tandis que le courant est fixe, c'est elle qui se dirige et se met en croix avec le courant. Si, au contraire, l'aimant est fixe et le courant mobile, c'est celui-ci qui se dirige et vient se mettre en croix avec l'aimant, le pôle austral occupant toujours la gauche. Pour démontrer ce principe, on dispose l'expérience comme le montre la figure 463. Le circuit que parcourt le courant est mobile, et,

au-dessous de sa branche inférieure, on approche un fort barreau aimanté : aussitôt le circuit se met à tourner, et s'arrête, après quelques oscillations, dans un plan perpendiculaire à l'aimant, de

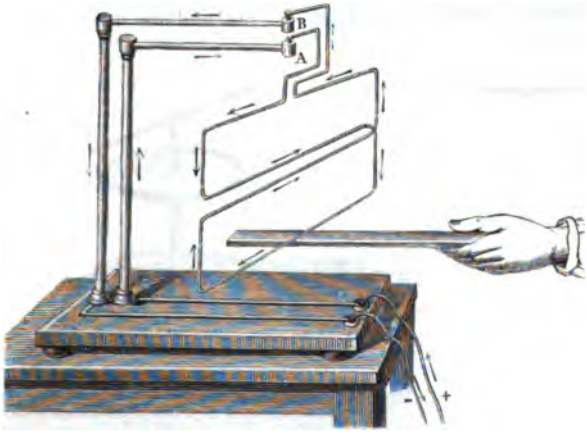


Fig. 463.

manière que le pôle austral de celui-ci se trouve à la gauche du courant dans la partie inférieure du circuit.

635. **Action directrice de la terre sur les courants verticaux.** — La terre, qui exerce une action directrice sur les aimants (544), agit aussi sur les courants, en leur imprimant tantôt une direction déterminée, tantôt un mouvement de rotation continu, suivant que ces courants sont disposés dans une direction verticale ou horizontale.

La première de ces deux actions, celle qui a pour effet de diriger les courants, peut se formuler ainsi : *Tout courant vertical, mobile autour d'un axe qui lui est parallèle, vient se placer, sous l'influence de l'action directrice de la terre, dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique, et s'arrête, après quelques oscillations, à l'est de son axe de rotation, lorsqu'il est descendant, et à l'ouest, quand il est ascendant.*

Ce fait se constate par l'expérience au moyen d'un appareil formé de deux vases de cuivre rouge *a* et K (fig. 464), d'inégale grandeur. Le plus grand, *a*, qui a environ 30 centimètres de diamètre, est percé, à son centre, d'une ouverture au milieu de la-

quelle s'élève une colonne de laiton *b*, isolée du vase *a*, mais communiquant avec le vase K. Cette colonne se termine par une petite capsule dans laquelle repose, par un pivot, une tige légère de bois. A l'une des extrémités de cette tige s'enroule un fil fin de platine *ce*, dont chaque bout plonge dans de l'eau acidulée qui remplit les deux vases.

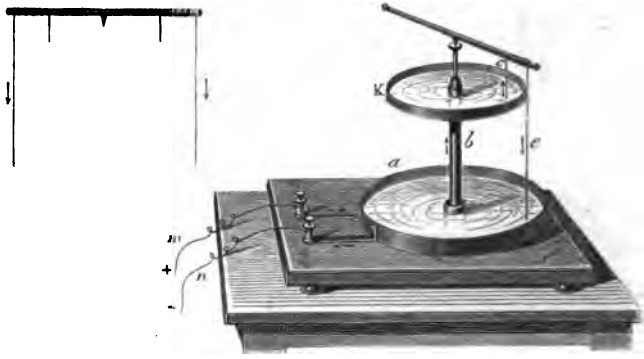


Fig. 465. Fig. 464.

Cela posé, le courant d'une pile arrivant par le fil *m*, comme le montre la direction des flèches dans le dessin ci-dessus, le courant passe dans une lame de cuivre qui, par-dessous la planchette de bois qui porte tout l'appareil, va se souder au pied de la colonne *b*. S'élevant alors dans cette colonne, le courant gagne le vase K et l'eau acidulée qu'il contient; de là il monte dans le fil *c*, redescend par le fil *e*, et se rendant aux parois du vase *a* au travers de l'eau acidulée que celui-ci contient, il atteint le fil *n*, qui le ramène à la pile.

Le courant se trouvant ainsi fermé, on voit le fil *e* se mouvoir autour de la colonne *b* et s'arrêter à l'est de cette colonne, lorsqu'il est descendant, comme cela a lieu dans le dessin; mais s'il est ascendant ce qu'on obtient en faisant arriver le courant de la pile par le fil *n*, le fil *e* s'arrête à l'ouest de la colonne *b*, dans une position diamétralement opposée à celle qu'il prend lorsqu'il est descendant.

Si à la tige de bois à un seul fil de la figure 464, on substitue celle à deux fils de la figure 465, cette tige ne se dirige plus, ce qui se conçoit facilement, puisque, chaque fil tendant à se placer

à l'est de la colonne *b*, il se produit deux effets égaux et de direction contraire qui se font équilibre.

656. **Action de la terre sur les courants horizontaux mobiles autour d'un axe vertical.** — L'action de la terre sur les courants horizontaux ne consiste plus à les diriger, mais *à leur imprimer un mouvement de rotation continue de l'est à l'ouest, en passant par le nord, quand le courant horizontal s'éloigne de l'axe de rotation; et de l'ouest à l'est, quand le courant se dirige vers cet axe.*

Cette action sur les courants horizontaux se démontre au moyen

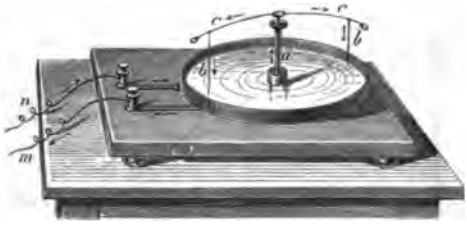


Fig 466.

de l'appareil représenté dans la figure 466, lequel ne diffère de celui de la figure 464 que parce qu'il n'a qu'un seul vase. Le courant montant par la colonne *a* passe dans les deux fils *cc* et descend par les fils *bb*, d'où il revient à la pile. C'est alors que le circuit *bccb* se met à tourner d'un mouvement continu, de l'est à l'ouest ou de l'ouest à l'est, suivant que dans les fils *cc* le courant s'écarte du centre, comme cela a lieu dans le dessin; ou suivant qu'il s'en rapproche, ce qu'on obtient en faisant arriver le courant de la pile par le fil *m*, au lieu de le faire arriver par le fil *n*.

Or, on a vu (655) que l'action de la terre sur les fils verticaux *bb* est détruite; c'est donc bien par son action sur les branches horizontales *cc* que la rotation se produit.

657. **Action directrice de la terre sur les courants fermés, mobiles autour d'un axe vertical.** — Si le courant sur lequel agit la terre est fermé, qu'il soit rectangulaire ou circulaire, ce n'est plus un mouvement de rotation continue qui se produit, mais une action directrice, comme dans le cas des courants verticaux (655), en vertu de laquelle *le courant vient se placer dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique, de manière qu'il soit descendant*

à l'est de son axe de rotation, pour un observateur qui regarde le nord, et ascendant à l'ouest.

Cette propriété, qui se constate au moyen de l'appareil représenté dans la figure 467, est une conséquence de ce qui a été dit sur les courants horizontaux et sur les courants verticaux. En effet, il en découle que dans le circuit fermé BDA, le courant, dans les parties supérieure et inférieure, tend à tourner en sens contraire, d'après la loi des courants horizontaux (656), et que, par conséquent, il y a équilibre; tandis que, dans les parties latérales, le courant tend à se placer d'un côté à l'est, de l'autre à l'ouest, d'après la loi des courants verticaux (655).

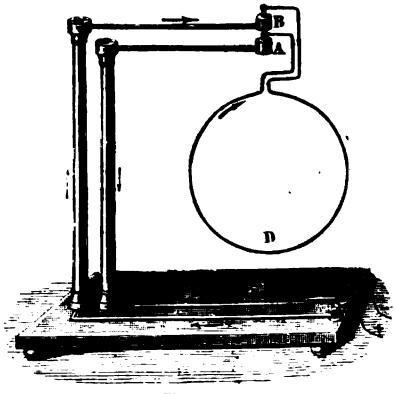


Fig. 467.

A cause de l'action directrice de la terre sur les courants, il est nécessaire, dans la plupart des expériences sur les courants, de les soustraire à cette action. Pour cela, on donne au circuit mobile une forme symétrique des deux côtés de son axe de rotation, de manière que les actions directrices de la terre sur les deux parties du circuit tendent à les faire tourner en sens contraire, et, par conséquent, se détruisent. Cette condition est remplie dans les circuits représentés dans les figures 468 et 469. C'est pourquoi on donne aux courants qui les parcourent le nom de *courants astatiques*.

Toutes les actions que la terre exerce sur les courants (655, 656 et 657) seront expliquées bientôt d'une manière très-simple (674), en s'appuyant sur les actions mutuelles qui s'exercent entre les courants électriques (664 à 668), et en adoptant une hypothèse due à Ampère, que la terre est parcourue, de l'est à l'ouest, par des courants électriques perpendiculaires au méridien magnétique.

CHAPITRE IV

ÉLECTRO-DYNAMIQUE, ATTRACTIONS ET RÉPULSIONS DES COURANTS PAR LES COURANTS.

658. **Actions mutuelles des courants électriques.** — Lorsque deux fils métalliques voisins sont traversés simultanément par un courant

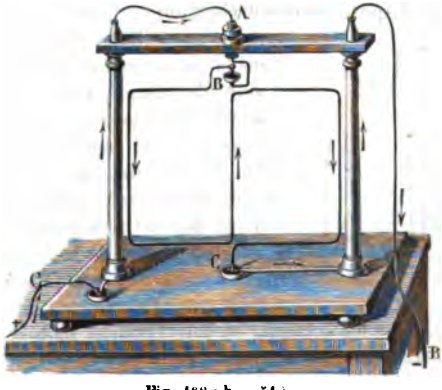


Fig. 468 (h = 51).

électrique, il se produit entre ces fils, selon la direction relative des deux courants, des attractions ou des répulsions analogues à celles qui s'exercent entre les pôles de deux aimants. Ces phénomènes, dont la découverte est due à Ampère, peu de temps après celles d'Œrsted (649), constituent une branche de l'électricité dynamique qu'on désigne sous le nom d'*électro-dynamique*. Les lois qui les régissent présentent différents cas, suivant que les courants sont parallèles ou angulaires, rectilignes ou sinueux.

659. **Lois des courants parallèles.** — 1° *Deux courants parallèles et de même sens s'attirent;*

2° *Deux courants parallèles et de sens contraires se repoussent.*

Pour démontrer ces lois, on partage le circuit que parcourt le courant en deux parties, l'une fixe, l'autre mobile, comme le montre la figure 468. La partie fixe se compose de deux colonnes de cuivre

placées verticalement sur une planchette de bois. L'électrode positive d'une pile de quatre à cinq couples Bunsen communiquant avec le pied de la colonne qui occupe la gauche du dessin, le courant monte dans cette colonne, se rend dans un fil A, et de là dans une capsule B contenant du mercure. A partir de celle-ci commence la partie mobile du circuit, laquelle se compose d'un fil de cuivre rouge, dont une extrémité repose, à l'aide d'un pivot, sur la capsule B, et l'autre plonge dans une seconde capsule C, de laquelle le courant s'élève dans la colonne à droite, qui, par son sommet, communique avec l'électrode négative de la pile.

D'après la disposition des flèches, on voit que le courant marche en sens contraires, dans les colonnes et dans le circuit mobile. Or, celui-ci, qu'on a soin de placer, avant le passage du courant, dans le plan des axes des colonnes, s'en éloigne en tournant sur son pivot B, aussitôt que le courant passe, ce qui démontre la deuxième loi.

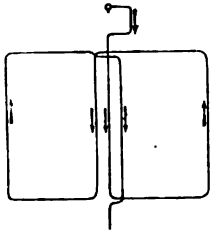


Fig. 469.

Pour démontrer la première, on enlève le circuit mobile de la figure 468, et on lui substitue celui représenté dans la figure 469. Le courant étant alors de même sens, dans les colonnes et dans la partie mobile, on constate qu'il y a attraction, car le circuit mobile revient toujours dans le plan des axes des deux colonnes aussitôt qu'on l'en éloigne.

660. **Lois des courants angulaires.** — 1° *Deux courants rectilignes, dont les directions forment entre elles un angle, s'attirent lorsqu'ils s'approchent ou s'éloignent tous les deux du sommet;*

2° *Ils se repoussent, si l'un marchant vers le sommet de l'angle, l'autre s'en éloigne.*

Pour démontrer ces deux lois, on fait généralement usage d'un appareil que nous avons donné dans nos précédentes éditions, et qui est dû à M. Pouillet. Mais cet appareil marche fort difficilement, et on doit lui préférer celui qui est représenté dans la figure 471. Ce dernier, qui n'est qu'une modification d'un appareil déjà adopté par Ampère pour démontrer les lois des courants angulaires, et qui est décrit dans le traité d'électricité de M. de La Rive, est extrêmement sensible, ainsi que nous l'avons constaté nous-même, l'ayant fait construire récemment par M. Deleuil.

On voit qu'il n'est autre chose que l'appareil déjà représenté dans

les figures 463 et 467; seulement, sur la planchette, on pose un petit cadre de bois *mn*, sur lequel s'enroule plusieurs fois un gros fil dans lequel passe le courant, de manière à multiplier son action sur le circuit mobile PQ, qui est astatique. Cela posé, le courant entrant par le pied de la colonne A, gagne le circuit PQ qu'il parcourt dans le sens indiqué par les flèches; puis revient par la colonne B, se rend dans le multiplicateur et sort en C. Or, ayant disposé le circuit mobile de manière que son plan fasse un angle

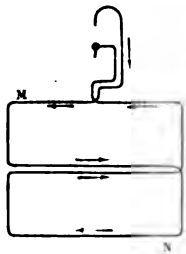


Fig. 470.

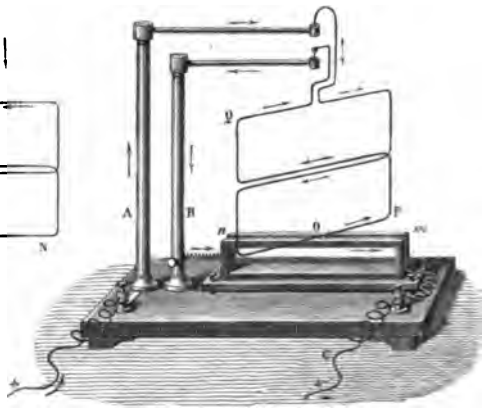


Fig. 471.

avec le multiplicateur, et le courant s'écartant du sommet de l'angle dans les deux fils, comme le montre la figure, on voit, aussitôt que le courant passe, l'angle PO*m* diminuer, ce qui montre que, conformément à la première loi, il y a attraction entre les deux courants. Au contraire, si au circuit PQ on substitue le circuit MN (fig. 470), les deux courants étant alors de sens contraire par rapport au sommet de l'angle PO*m*, on voit celui-ci augmenter, ce qui fait voir qu'il y a répulsion, et prouve la seconde loi.

Ampère a conclu de la deuxième loi ci-dessus qu'un courant angulaire tend à se redresser, et que, *dans un courant rectiligne, chaque élément du courant repousse le suivant et en est repoussé*. On essaie ordinairement de démontrer ce principe en faisant voir que lorsque le courant passe d'un bain de mercure dans un petit fil de cuivre qui repose sur la surface du liquide, ce fil

est repoussé ; mais la résistance qui résulte du changement de conducteur peut suffire pour produire le phénomène.

661. Lois des courants sinueux. — *L'action d'un courant sinueux est la même que celle d'un courant rectiligne de longueur égale en projection.* Ce principe se démontre en disposant un courant *mno*, moitié sinueux, moitié rectiligne, près d'un courant mobile ABCD (fig. 472). On n'observe alors ni attraction ni répulsion, ce qui fait voir que l'action de la portion sinueuse *mn* fait équilibre à la portion rectiligne *no*.

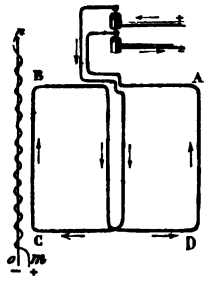


Fig. 472.

Ce principe sur les courants sinueux trouvera bientôt son application dans de petits appareils qu'on nomme solénoïdes, et qui sont formés de la combinaison d'un courant rectiligne avec un courant sinueux (667).

DIRECTION DES COURANTS PAR LES COURANTS.

662. Action d'un courant indéfini sur un courant perpendiculaire à sa direction. — D'après l'action qui s'exerce entre deux

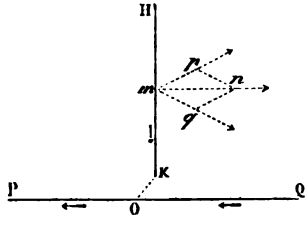


Fig. 473.

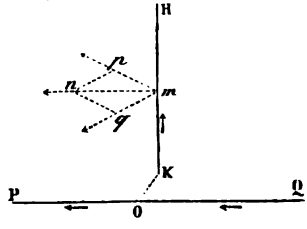


Fig. 474.

courants angulaires (660), on peut facilement déterminer celle qu'exerce un courant rectiligne PQ (fig. 473), fixe et indéfini, sur un courant mobile KH perpendiculaire à sa direction. Pour cela, soit OK la perpendiculaire commune à KH et PQ, laquelle est nulle, si les deux lignes PQ et KH se rencontrent. Le courant PQ étant dirigé de Q vers P, dans le sens des flèches, considérons d'abord le cas où le courant KH se rapproche du courant PQ. D'après la première loi des courants angulaires (660), la portion QO du courant

PQ attire le courant KH, puisque ces courants se dirigent tous les deux vers le sommet de l'angle formé par leurs directions. Quant à la portion PO du courant PQ, elle repousse au contraire le courant KH, car ici les deux courants sont de sens contraires par rapport au sommet de l'angle formé par leurs directions. Représentant donc par *mq* et *mp* les deux forces, l'une attractive, l'autre répulsive, qui sollicitent le courant KH, forces qui sont nécessairement de même intensité, puisque tout est symétrique des deux côtés du point O, on sait (29) que ces deux forces se composent en une force unique *mn*, laquelle tend à entraîner le courant KH parallèlement au courant PQ, dans un sens opposé à ce dernier.

Si l'on considère le cas où le courant KH s'éloigne du courant

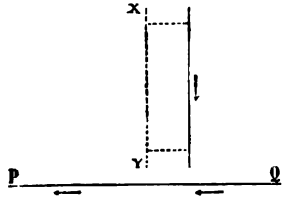


Fig. 475.

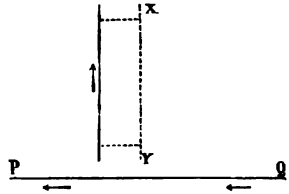


Fig. 476.

PQ (fig. 474), on reconnaît facilement qu'il est encore entraîné parallèlement à ce courant, mais dans le même sens que lui.

On peut donc poser ce principe général : *Un courant fini mobile, qui s'approche d'un courant fixe indéfini, est sollicité à se mouvoir dans une direction parallèle et opposée à celle du courant fixe; si le courant mobile s'écarte du courant fixe, il est encore sollicité à se mouvoir parallèlement à ce courant, mais dans le même sens.*

Il suit de là qu'un courant vertical étant mobile autour d'un axe XY parallèle à sa direction (fig. 475 et 476), tout courant horizontal PQ a pour effet de faire tourner le courant mobile autour de son axe, *jusqu'à ce que le plan de l'axe et du courant soit devenu parallèle à* PQ, le courant vertical s'arrêtant, par rapport à son axe, *du côté d'où vient le courant* PQ (fig. 475), ou *du côté où il se dirige* (fig. 476), *selon que le courant vertical est descendant ou ascendant;* c'est-à-dire selon qu'il s'approche ou qu'il s'écarte du courant horizontal.

On tire encore du principe ci-dessus qu'un système de deux courants verticaux, tournant ensemble autour d'un axe vertical (fig. 477

et 478), est dirigé par un courant horizontal PQ dans un plan parallèle à ce courant, quand des deux courants verticaux l'un est ascendant et l'autre descendant (fig. 477); mais que s'ils sont tous

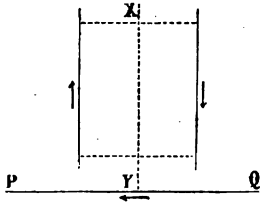


Fig. 477.

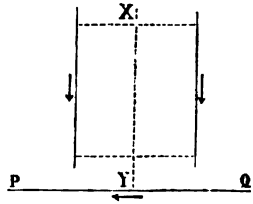


Fig. 478.

deux descendants (fig. 478) ou tous deux ascendants, ils ne sont pas dirigés.

663. **Action d'un courant rectiligne indéfini sur un courant rectangulaire ou circulaire.** — Il est facile de reconnaître qu'un courant horizontal indéfini exerce sur un courant rectangulaire mo-

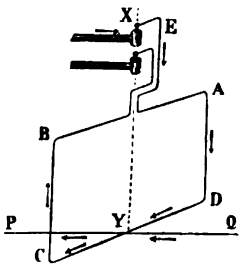


Fig. 479.

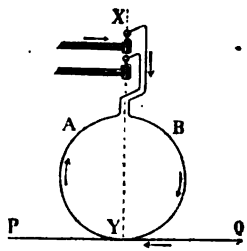


Fig. 480.

bile autour d'un axe vertical (fig. 479), la même action directrice que ci-dessus. En effet, d'après la direction des courants marquée par les flèches, la portion QY agit par attraction non-seulement sur la portion horizontale YD (loi des courants angulaires), mais encore sur la partie verticale AD (loi des courants perpendiculaires, 662). La même action a évidemment lieu entre la portion PY et les parties CY et BC. Donc *le courant fixe* PQ *tend à diriger le courant rectangulaire mobile* ABCD *dans une position parallèle à* PQ, *et telle que dans les fils* CD *et* PQ, *le sens des deux courants soit le même.*

Ce principe est facile à démontrer par l'expérience en plaçant le circuit ABCDE sur l'appareil à deux colonnes de la figure 467, et en faisant passer au-dessous un courant un peu intense qui fasse d'abord avec lui un angle plus ou moins aigu. Toutefois, il sera préférable de faire usage du circuit même de la figure 463, qui est astatique (657), tandis que celui de la figure 479 ne l'est pas.

Tout ce qu'on vient de dire sur le courant rectangulaire de la figure 479 s'applique exactement au courant circulaire de la figure 480, et se vérifie de la même manière par l'expérience.

ROTATION DES COURANTS PAR LES COURANTS.

664. **Rotation d'un courant horizontal fini par un courant rectiligne horizontal indéfini.** — Les attractions et les répulsions qu'exercent entre eux les courants angulaires peuvent facilement se transformer en mouvement circulaire continu. Pour cela, soit un courant OA (fig. 481), mobile autour du point O, dans un plan horizontal, et soit PQ un courant indéfini, aussi horizontal. Ces deux courants étant dirigés dans le sens des flèches, il s'ensuit que, dans la position OA, le courant mobile est attiré par le courant PQ, puisqu'ils sont de même sens. Arrivé dans la position OA', le courant mobile est attiré par la portion NQ du courant fixe et repoussé par la portion PN. De même dans la position OA'', il est attiré par MQ et repoussé par PM, et ainsi de suite; d'où résulte un mouvement de rotation continu dans le sens AA'A''A'''..... Si le courant mobile, au lieu d'être dirigé de O vers A, l'était de A vers O, il est facile de voir que la rotation aurait lieu en sens contraire. Donc, *par l'effet du courant fixe indéfini* PQ, *le courant mobile* OA *tend à tourner d'un mouvement continu dans une direction rétrograde à celle du courant fixe.*

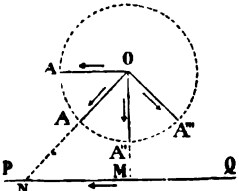


Fig. 481.

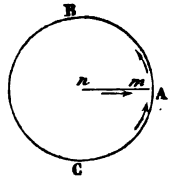


Fig. 482.

Si les deux courants étant encore horizontaux, le courant fixe est circulaire au lieu d'être rectiligne, il est facile de reconnaître que son effet sera encore de produire un mouvement circulaire continu.

Soient, en effet, deux courants placés dans un plan horizontal, l'un ABC (fig. 482), fixe et circulaire, l'autre *mn*, rectiligne et mobile autour du centre *n*. Ces courants étant dirigés dans le sens des flèches, s'attirent dans l'angle *n*AC, car ils vont tous les deux vers le sommet (660, 1°). Dans l'angle *n*AB, au contraire, ils se repoussent, car l'un va vers le sommet, tandis que l'autre s'en éloigne. Les deux effets concourent donc pour faire tourner le fil *mn* d'une manière continue dans le sens ACB.

665. **Rotation d'un courant vertical par un courant circulaire horizontal.** — Un courant circulaire horizontal, qui agit sur un courant rectiligne vertical, lui imprime aussi un mouvement de

Fig. 483.

rotation continu. Pour le démontrer, on fait usage de l'appareil représenté dans la figure 483. Il se compose d'un vase de cuivre rouge autour duquel s'enroule une lame de même métal recouverte de soie ou de laine, et parcourue par un courant fixe. Au centre du vase est une colonne de laiton *a*, terminée par une capsule qui contient du mercure. Dans celui-ci plonge un pivot qui supporte un fil de cuivre rouge *bb*, recourbé à ses extrémités en deux branches verticales qui viennent se souder à un anneau très-léger de cuivre rouge, plongeant dans de l'eau acidulée contenue dans le vase. Cela posé, le courant d'une pile arrivant par le fil *m* se rend dans la lame A, d'où, après avoir fait plusieurs circuits autour du vase, il arrive à la lame B, et de là gagne, au-dessous du vase, la partie inférieure de la colonne *a*. Montant alors dans cette colonne, il passe dans les fils *bb*, dans l'anneau de cuivre rouge, dans l'eau acidulée et dans les parois du vase, d'où il revient à la pile par le fil D. Le courant se trouvant ainsi fermé, le circuit *bb* et l'anneau se mettent à tourner en sens contraire du courant fixe, mouvement qui est bien dû à l'action du courant circulaire sur le courant des

branches verticales *bb*, comme il est facile de le voir d'après les deux lois des courants angulaires, la branche *b*, de droite, étant attirée en avant par la portion A du circuit fixe, et la branche *b*, de gauche, l'étant en sens contraire par la portion opposée. Quant à l'action du courant circulaire sur la partie horizontale du circuit *bb*, elle concourt évidemment pour faire tourner dans le même sens.

666. **Rotation des aimants par les courants.** — Les mêmes mouvements de rotation que les courants font prendre aux courants, ils

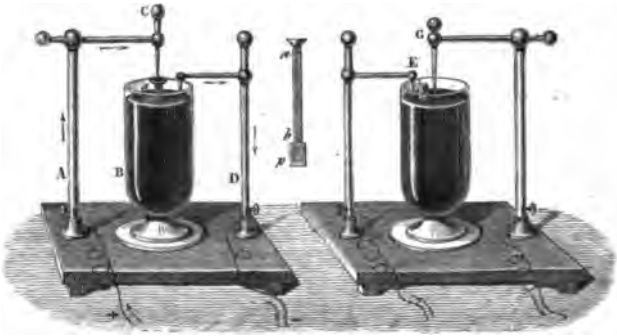


Fig. 484. Fig. 485.

les impriment aussi aux aimants, ce que M. Faraday, le premier, a démontré au moyen de l'appareil représenté dans la figure 484. Cet appareil se compose d'une large éprouvette de verre remplie à peu près complétement de mercure. Au centre de ce liquide plonge un aimant de 20 centimètres de longueur environ, s'élevant de quelques millimètres au-dessus de la surface du mercure, et lesté, à sa partie inférieure, par un cylindre de platine, comme il est représenté en *ab* sur la droite de l'appareil. A la partie supérieure de l'aimant est adaptée une petite capsule de cuivre rouge contenant du mercure; c'est dans cette capsule qu'arrive le courant par une tige C. Cela posé, aussitôt que le courant, montant par la colonne A, passe dans l'aimant, de là dans le mercure, et sort par la colonne D, on voit l'aimant tourner sur lui-même, autour de son axe, avec une vitesse qui dépend de sa puissance magnétique et de l'intensité du courant.

On explique ce mouvement de rotation en s'appuyant sur la théorie d'Ampère qui va être donnée ci-après, et d'après laquelle les aimants sont parcourus sur leur contour par une infinité de cou-

rants circulaires de même sens, dans des plans perpendiculaires à l'axe de l'aimant (572). Cela posé, au moment où, dans l'expérience ci-dessus, le courant passe de l'aimant dans le mercure, il se divise, à la surface de celui-ci, en une infinité de courants rectilignes dirigés de l'axe de l'aimant à la périphérie de l'éprouvette. Or, chacun de ces courants agit sur les courants de l'aimant, de la même manière que, dans la figure 482 ci-dessus, le courant rectiligne *mn* agit sur le courant circulaire CAB, c'est-à-dire que le cercle CAB figurant un des courants de l'aimant, il y a attraction dans l'angle *n*AC et répulsion dans l'angle *n*AB, et par suite rotation continue de l'aimant autour de son axe. C'est seulement sur l'extrémité supérieure de l'aimant que s'exerce l'action du courant; et si le pôle austral est en haut, comme dans le dessin ci-dessus, la rotation s'effectue de l'ouest à l'est en passant par le nord. Le sens de la rotation change si l'on met le pôle austral en bas, ou si l'on renverse le sens du courant.

Au lieu de faire tourner l'aimant sur son axe, on le fait tourner autour d'une droite parallèle à cet axe, en disposant l'expérience comme le montre la figure 485. Enfin, réciproquement, on fait aussi tourner des courants pas l'influence d'un fort aimant.

SOLÉNOÏDES.

667. **Composition d'un solénoïde.** — On nomme *solénoïde* un système de courants circulaires égaux et parallèles, formés d'un même fil de cuivre recouvert de soie et replié sur lui-même en hélice, comme le montre la figure 486. Toutefois, un solénoïde n'est complet qu'autant qu'une partie BC du fil est ramenée suivant l'axe dans l'intérieur de l'hélice.

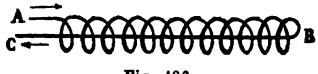


Fig. 486.

Avec cette disposition, lorsque le circuit est parcouru par un courant, il résulte de ce qui a été dit sur les courants sinueux (661) que l'action du solénoïde, dans le sens de sa longueur AB, est détruite par celle du courant rectiligne BC. Cette action est donc nulle dans le sens de la longueur, et, par conséquent, l'effet du solénoïde équivaut rigoureusement, dans une direction perpendiculaire à l'axe, à celui d'une suite de courants circulaires égaux et parallèles.

668. **Action des courants sur les solénoïdes.** — Ce qui a été dit de l'action des courants rectilignes fixes sur les courants finis, rectangulaires ou circulaires (663), s'appliquant évidemment à chacun

des circuits d'un solénoïde, il en résulte qu'un courant rectiligne doit tendre à diriger ces circuits parallèlement à lui-même. Pour constater ce fait par l'expérience, on construit le solénoïde comme le montre la figure 487, de manière à pouvoir le suspendre par deux pivots sur les godets A et B de l'appareil représenté dans la figure 467. Le solénoïde est alors très-mobile autour d'un axe vertical, et si l'on dirige en dessous, parallèlement à son axe, un courant rectiligne qui passe en même temps dans les fils du solénoïde, on voit celui-ci tourner et se mettre en croix avec le courant, c'est-à-dire dans une position telle que ses circuits se trouvent parallèles au courant fixe, et, de plus, dans la partie inférieure de chacun d'eux, le courant est de même sens que dans le fil rectiligne.

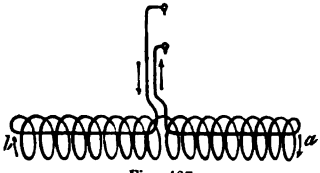


Fig. 487.

Si au lieu de faire passer horizontalement un courant rectiligne au-dessous du solénoïde, on le fait passer verticalement sur le côté, on observe une attraction ou une répulsion, suivant que, dans le fil vertical et dans la partie du solénoïde la plus voisine, les deux courants sont de même sens ou de sens contraires.

669. **Action directrice de la terre sur les solénoïdes.** — Si l'on pose, sur les godets A et B de l'appareil à deux colonnes de la figure 467, le solénoïde à suspension représenté dans la figure 487, et qu'on le dirige d'abord hors du méridien magnétique, on observe qu'aussitôt qu'un courant assez énergique passe dans le solénoïde, celui-ci entre en mouvement et s'arrête dans une direction telle que son axe est parallèle à la direction de l'aiguille de déclinaison (546). De plus, dans la partie inférieure des courants circulaires qui composent le solénoïde, le courant est dirigé de l'est à l'ouest. L'action directrice de la terre sur les solénoïdes est donc la conséquence de celle qu'elle exerce sur les courants circulaires (657).

Dans cette expérience, le solénoïde se dirigeant comme une aiguille aimantée, on nomme *pôle austral*, de même que dans les aimants, l'extrémité qui se dirige vers le nord, et *pôle boréal* celle qui se dirige vers le sud.

670. **Actions mutuelles des aimants et des solénoïdes.** — Il se manifeste entre les solénoïdes et les aimants identiquement les mêmes phénomènes d'attraction et de répulsion réciproques qu'entre les aimants. En effet, si l'on présente à un solénoïde mobile et

traversé par un courant, un des pôles d'un fort barreau aimanté, il y a répulsion ou attraction, suivant que les pôles de l'aimant et du solénoïde qu'on met en présence sont de même nom ou de noms contraires.

Réciproquement, le même phénomène a lieu si l'on présente à une aiguille aimantée mobile un solénoïde qu'on tient à la main tandis qu'il est traversé par un courant. La loi des attractions et des répulsions des aimants (537) s'applique donc exactement aux actions mutuelles des solénoïdes et des aimants.

671. **Actions mutuelles des solénoïdes.** — Lorsqu'on fait agir l'un sur l'autre deux solénoïdes traversés par un courant assez

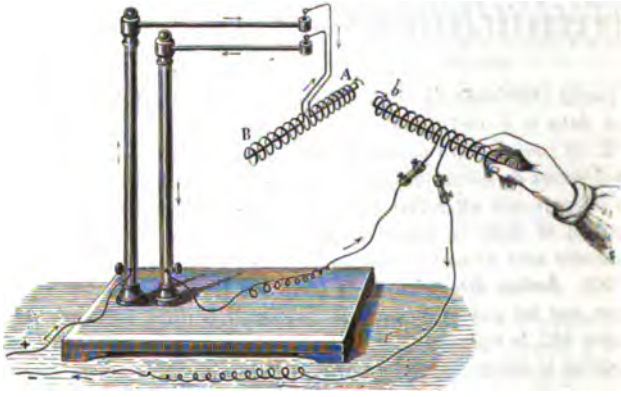


Fig. 488.

puissant, l'un qu'on tient à la main, l'autre mobile autour d'un axe vertical passant par son centre de figure, comme le montre la figure 488, on observe, entre les extrémités de ces deux solénoïdes, des phénomènes d'attraction et de répulsion identiques à ceux que présentent entre eux les pôles des aimants; ces phénomènes s'expliquent par la direction relative des courants dans les extrémités mises en présence (659).

672. **Théorie d'Ampère sur le magnétisme.** — Se fondant sur l'analogie qui existe entre les solénoïdes et les aimants, Ampère a donné une théorie ingénieuse, à l'aide de laquelle les phénomènes magnétiques rentrent dans le domaine de l'électro-dynamique.

Au lieu d'attribuer les phénomènes magnétiques à l'existence de deux fluides (538), Ampère les a attribués à des courants voltaïques

circulaires qui existeraient autour des molécules des substances magnétiques. Quand ces substances ne sont pas aimantées, les courants moléculaires ont lieu dans toutes les directions, et la résultante de leurs actions électro-dynamiques est nulle.

Dans les aimants, au contraire, les courants moléculaires étant tous parallèles et de même sens, leurs actions concordantes ont une résultante qui équivaut à un courant unique dirigé circulairement à la surface de l'aimant, comme le représente la figure 489; en sorte que les aimants ne sont que des solénoïdes, et que les attractions et les répulsions magnétiques ne sont autre chose qu'une conséquence des actions des courants sur les courants.

Fig. 489.

Enfin, dans cette théorie, pour expliquer les effets magnétiques terrestres, on admet l'existence de courants électriques circulant sans cesse autour de notre globe, de l'est à l'ouest, perpendiculairement au méridien magnétique. Quant à leur nature, ce seraient des courants thermo-électriques (707) dus aux variations de température qui résultent de la présence successive du soleil sur les différentes parties de la surface du globe, de l'orient vers l'occident.

Ce sont ces courants qui dirigent les aiguilles des boussoles et donnent aux minerais de fer une aimantation naturelle. Ce sont eux enfin qui sont cause de l'action de la terre sur les courants horizontaux et verticaux (655 et 656), action qui maintenant s'explique sans difficulté d'après ce qui a été dit de l'action d'un courant horizontal indéfini sur les courants horizontaux et sur les courants verticaux (663 et 664).

CHAPITRE V

AIMANTATION PAR LES COURANTS, ÉLECTRO-AIMANTS, TÉLÉGRAPHES ÉLECTRIQUES.

673. **Aimantation par les courants.** — D'après l'influence que les courants exercent sur les aimants, en tournant le pôle austral à gauche et le pôle boréal à droite, il est naturel de penser qu'en agissant sur les substances magnétiques à l'état naturel, les courants doivent tendre à séparer les deux fluides magnétiques. On observe, en effet, qu'en plongeant un fil parcouru par un courant dans de

la limaille de fer, celle-ci s'y attache abondamment, et retombe aussitôt que le courant cesse; tandis que l'action est nulle sur la limaille de tout autre métal non magnétique.

L'action des courants sur les substances manétiques est surtout sensible quand on enroule, comme l'a fait Ampère, un fil de cuivre recouvert de soie autour d'un tube de verre, et qu'on place dans celui-ci un barreau d'acier non aimanté. On observe qu'il suffit qu'un courant traverse le fil, même pendant un temps très-court, pour que le barreau soit fortement aimanté.

Si, au lieu de faire traverser le fil par le courant de la pile, on y fait passer la décharge d'une bouteille de Leyde, en mettant en communication l'un des bouts avec l'armature extérieure, et l'autre

Fig 491.

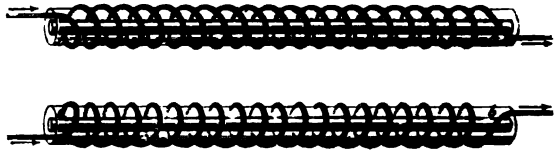


Fig. 490.

avec l'armature intérieure, on trouve encore que le barreau s'aimante. On peut donc aimanter également par l'électricité voltaïque et par l'électricité des machines.

Dans l'expérience ci-dessus, l'enroulement du fil peut avoir lieu de gauche à droite en dessus, et alors on a une *hélice dextrorsum* (fig. 490); ou bien l'enroulement se fait de gauche à droite en dessous, et alors on a une *hélice sinistrorsum* (fig. 491). Dans la première hélice, le pôle boréal du barreau est toujours à l'extrémité par laquelle entre le courant; c'est le contraire qui a lieu dans l'hélice sinistrorsum.

La nature du tube sur lequel s'enroule l'hélice n'est pas sans influence. Le bois et le verre sont sans effet; mais un cylindre de cuivre épais peut détruire complétement l'effet du courant. Il en est de même avec le fer, l'argent et l'étain.

Du reste, pour aimanter un barreau d'acier par l'électricité, il n'est pas nécessaire de le placer dans un tube, comme le montrent les figures 490 et 491. Il suffit de l'entourer, dans toute sa longueur, d'un fil de cuivre recouvert de soie, afin d'isoler les uns des autres les circuits du fil. L'action du courant se trouve ainsi

multipliée (650) lorsqu'on le fait passer dans le fil, et il suffit d'un courant peu intense pour obtenir un fort degré d'aimantation.

D'après de nombreuses expériences faites par de Haldat, un cylindre de fer doux, creux, quelque mince que soit son enveloppe, acquiert, lorsqu'il est placé dans une hélice parcourue par un courant, sensiblement la même intensité magnétique qu'un cylindre plein de même dimension. De Haldat a conclu de là que, dans les aimants, le magnétisme réside tout entier à la surface, leur masse n'exerçant presque pas d'influence sur leur puissance magnétique.

Fig 492.

674. **Électro-aimants.** — On nomme *électro-aimants* des barreaux de fer doux qui s'aimantent sous l'influence d'un courant voltaïque, mais seulement d'une manière temporaire, car la force coercitive du fer doux étant nulle (541), les deux fluides magnétiques se neutralisent aussitôt que le courant ne passe plus dans le fil. Toutefois, si le fer n'est pas parfaitement pur, il conserve des traces d'aimantation plus ou moins sensibles. On dispose les électro-aimants en fer à cheval, comme le montre la figure 492, et on enroule un grand nombre de fois, sur les deux branches, un même fil de cuivre recouvert de soie, de manière à former deux bobines A et B. L'enroulement doit se faire en sens contraire sur les deux bobines, afin que les deux extrémités du barreau soient deux pôles de nom contraire.

On a fait de nombreuses recherches dans le but de déterminer les conditions à remplir pour obtenir des électro-aimants la plus grande puissance possible, et apprécier l'influence exercée par les dimensions du fer à cheval, par le diamètre et le nombre des tours du fil conducteur, et enfin par l'intensité et l'origine du courant qui

parcourt ce fil. Quoique jusqu'ici les résultats obtenus n'aient pas toujours la concordance désirable, on admet, en général, que les meilleures conditions à observer sont les suivantes :

1° Le fer du barreau doit être le plus doux possible, qualité qui ne dépend pas seulement de son degré de pureté, mais aussi de la manière dont il est préparé; car il doit être recuit plusieurs fois, en ayant soin de le refroidir très-lentement.

2° La forme et les dimensions du barreau modifiant sa puissance magnétique, il résulte des travaux de MM. Lentz, Jacoby, Muller, Dub et Niklès, que toutes les autres conditions restant les mêmes, la longueur des branches d'un électro-aimant est sans influence sur le poids qu'il peut porter, quand le barreau est recourbé en fer à cheval et que les deux bobines sont enroulées en sens contraire; mais si le barreau est rectiligne, ne formant qu'une seule bobine, ou si, étant en fer à cheval, ses deux bobines sont enroulées dans le même sens, le pouvoir attractif augmente avec la longueur du barreau. Quant à la grosseur du cylindre de fer doux, M. le docteur J. Dub a trouvé récemment que la puissance d'un électro-aimant, pour faire dévier l'aiguille aimantée, est proportionnelle à la racine carrée du diamètre de ce cylindre, et que s'il s'agit de porter des poids elle est proportionnelle au même diamètre. Enfin, pour des courants intenses, la puissance d'un électro-aimant augmente avec l'écartement des bobines. « En général, disent MM. Becquerel dans leur traité d'électricité, on s'en tient aux dimensions suivantes : la longueur de chaque branche enveloppée de fil varie entre 2 fois et demie et 4 fois le diamètre du barreau de fer; l'écartement des branches, à l'intérieur, a de 1 fois et demie à 2 fois le diamètre du fer; quant à la longueur du fil enroulé, elle dépend des effets qu'on veut produire, et on entoure habituellement les deux branches jusqu'à ce que les bobines de chaque côté se touchent par les dernières rangées des tours de spires du fil. »

3° Pour des courants peu énergiques, on admet que, toutes choses égales d'ailleurs, l'intensité magnétique de l'électro-aimant est proportionnelle au nombre des spires de la bobine; mais cette loi ne peut être admise que jusqu'à une certaine limite, puisque la puissance magnétique de tout aimant a un maximum qui correspond au point de saturation. Du reste, la longueur du fil, et par suite le nombre des spires varient avec les effets qu'on se propose d'obtenir. S'il s'agit de construire un électro-aimant destiné à porter des poids considérables, on doit faire usage d'une pile à grande surface, et faire choix d'un gros fil, de 1 jusqu'à 3 ou 4 millimètres

de diamètre, ce qui ne permet pas de lui faire faire un très-grand nombre de tours. Si, au contraire, on a un courant faible, comme dans la télégraphie électrique, on fait usage d'un fil très-long et à petit diamètre, afin d'obtenir un très-grand nombre de spires, et d'augmenter ainsi la puissance de l'électro-aimant.

On verra bientôt les nombreuses applications qu'on a faites des électro-aimants dans les télégraphes électriques, dans les moteurs électro-magnétiques, dans les horloges électriques et dans l'étude des phénomènes diamagnétiques.

* 675. **Mouvement vibratoire et sons produits par les courants.** — Lorsqu'une tige de fer doux s'aimante par l'influence d'un fort courant électrique, elle rend un son très-prononcé, qui varie selon que la tige est plus ou moins allongée, mais qui ne se produit qu'à l'instant où le courant est fermé et à l'instant où il est interrompu. Ce phénomène, qui a d'abord été observé par M. Page en Amérique, et par M. Delezenne, en France, a surtout été étudié par M. de La Rive, qui l'attribue à un mouvement vibratoire des molécules du fer par l'effet d'une succession rapide d'aimantations et de désaimantations.

En interrompant et en rétablissant le courant à des intervalles très-rapprochés, ce savant a observé que, quelle que soit la forme ou la grandeur des tiges de fer doux, on distingue toujours deux sons : l'un, qui est musical, correspond à celui que donnerait la barre en vibrant transversalement; l'autre, qui consiste en une suite de coups secs, correspondant aux alternatives du courant, est comparé par M. de La Rive au bruit de la pluie tombant sur un toit de métal. Le son le plus éclatant, dit-il, est celui qu'on obtient en tendant, sur une table d'harmonie, des fils de fer doux de 1 à 2 millimètres de diamètre, bien recuits et longs de 1 à 2 mètres. Ces fils étant placés dans l'axe d'une ou de plusieurs bobines traversées par des courants puissants, ils produisent un ensemble de sons dont l'effet est surprenant et ressemble beaucoup à celui de plusieurs cloches d'église vibrant ensemble dans le lointain.

M. de La Rive a encore obtenu les mêmes sons en faisant passer le courant discontinu, non plus dans des bobines entourant des fils de fer, mais dans les fils de fer eux-mêmes. Le son musical est même alors plus fort et plus sonore, en général, que dans la première expérience.

L'hypothèse d'un mouvement moléculaire dans les fils de fer, au moment de leur aimantation et de leur désaimantation, est confirmée

par les recherches de M. Wertheim, qui a trouvé que les fils perdent alors de leur élasticité, et par celles de M. Joule, qui a constaté que le diamètre des fils diminue, mais que leur longueur augmente.

TÉLÉGRAPHES ÉLECTRIQUES.

676. **Différentes sortes de télégraphes électriques.** — Les *télégraphes électriques* sont des appareils qui servent à transmettre des signaux à de grandes distances, au moyen de courants voltaïques qui se propagent dans de longs fils métalliques. Dès le siècle dernier, plusieurs physiciens avaient proposé de correspondre à distance au moyen des effets produits par l'électricité des machines électriques, lorsqu'elle se propage dans des fils conducteurs isolés.

En 1811, Sœmmering imagina un télégraphe fondé sur l'emploi, comme moyen indicateur, de la décomposition de l'eau par la pile. En 1820, à une époque où l'électro-aimant n'était pas connu, Ampère, s'appuyant sur l'expérience d'Œrsted (649), proposa de correspondre au moyen d'aiguilles aimantées au-dessus desquelles on dirigerait un courant, en faisant usage d'autant d'aiguilles et d'autant de fils qu'il y a de lettres. En 1837, M. Steinheil, à Munich, et M. Wheatstone, à Londres, construisaient des télégraphes à plusieurs fils agissant chacun sur une aiguille aimantée, la source du courant étant un appareil électro-magnétique de Clarke, ou une pile à courant constant. Mais le télégraphe ne pouvait acquérir toute la simplicité désirable que par l'emploi d'électro-aimants. C'est ce système qu'adopta M. Wheatstone en 1840.

Tout en conservant le même principe, on a varié beaucoup la forme des télégraphes électriques, mais on peut tous les rapporter aux quatre suivants que nous allons successivement décrire : le télégraphe à cadran, le télégraphe à signaux, le télégraphe écrivant et le télégraphe électro-chimique.

677. **Télégraphe à cadran.** — Il existe plusieurs sortes de télégraphes à cadran. Celui qui est représenté dans les figures 493 et 494 a été construit par M. Froment. Ce télégraphe est destiné à la démonstration, mais son principe est le même que celui des télégraphes électriques établis le long des voies de fer. Comme eux, il se compose de deux appareils distincts, l'un, le *manipulateur*, destiné à transmettre les signaux (fig. 493); l'autre, le *récepteur*, destiné à les recevoir (fig. 494). Le premier appareil communique avec une pile à charbon Q, et les deux appareils sont en communication par deux fils métalliques, de fer ou de cuivre, qui vont,

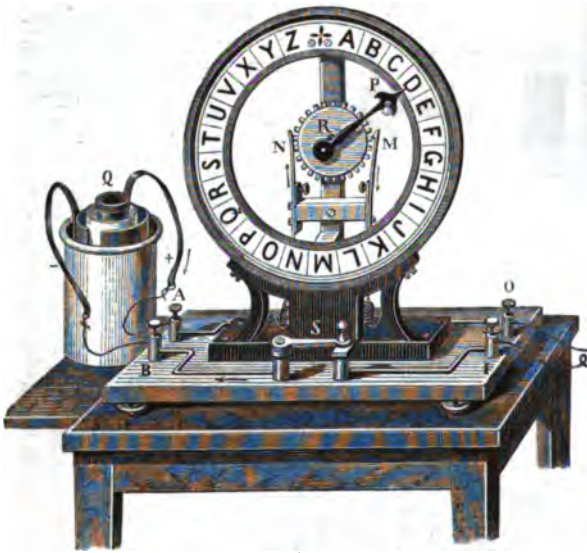


Fig. 493.

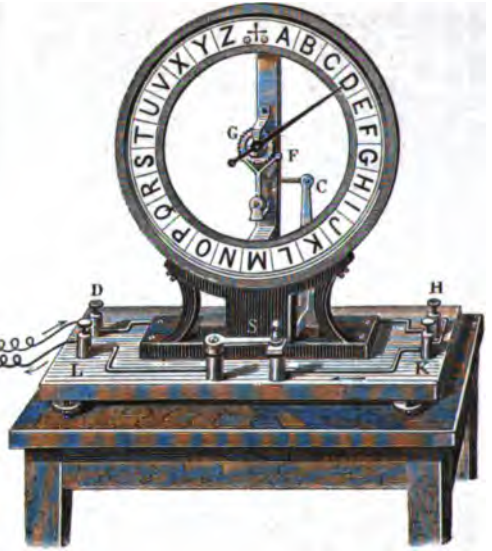


Fig. 494.

l'un, AOD (fig. 493), de la station de départ à la station d'arrivée, et l'autre, HKLI (fig. 494), de celle-ci à la première. Enfin, les deux appareils sont munis chacun d'un cadran portant les 25 lettres, sur lequel se meut une aiguille. C'est la main de l'expérimentateur qui fait tourner l'aiguille de la station de départ, mais c'est l'électricité qui fait marcher celle de la station d'arrivée.

Cela posé, voici la marche du courant dans les deux appareils et les effets qu'il produit. De la pile, il se rend par un fil de cuivre A (fig. 493) à une lame de laiton N en contact avec une roue métallique R, passe dans une seconde lame M, puis dans le fil O, qui joint l'autre station. Là, le courant se rend dans la bobine d'un électro-aimant *b*, masqué dans la figure 494, mais représenté en profil dans la figure 495, qui montre la partie postérieure de l'appareil. Cet électro-aimant est fixé horizontalement à une extrémité, et à l'autre il attire une armature de fer doux *a*, qui fait partie d'un levier coudé mobile autour de son point d'appui *o*, tandis qu'un ressort à boudin *r* sollicite le même levier en sens contraire.

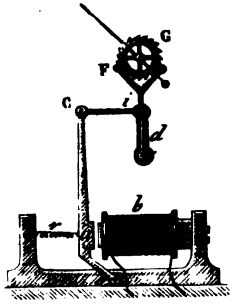


Fig. 495.

Cela posé, lorsque le courant passe, l'électro-aimant attire le levier *a*C, qui, par une tige *i*, vient agir sur un second levier *d*, fixé à un axe horizontal, lié lui-même à une fourchette F. Lorsque le courant est interrompu, le ressort *r* ramène le levier *a*C, et avec lui toutes les pièces qui en dépendent; de là résulte un mouvement de va-et-vient qui se communique à la fourchette F, laquelle le transmet à une roue à rochet G, dont l'axe porte l'aiguille indicatrice. D'après l'inclinaison de ses dents, la roue G est toujours entraînée dans le même sens par la fourchette, ce qui est indispensable.

Pour se rendre compte des intermittences de l'électro-aimant, il faut se reporter à la figure 493. La roue R porte 26 dents, dont 25 correspondent aux lettres de l'alphabet, et la dernière à l'intervalle réservé entre les lettres A et Z. Quand, tenant le bouton P à la main, on fait tourner la roue R, l'extrémité de la lame N, d'après sa courbure, est toujours en contact avec les dents; la lame M, au contraire, se termine par une camme taillée de manière qu'il y a successivement contact et solution de continuité. Par conséquent, les communications avec la pile étant établies, si l'on fait avancer

l'aiguille P de quatre lettres, par exemple, le courant passe quatre fois de N en M, et quatre fois il est interrompu. L'électro-aimant de la station d'arrivée deviendra donc quatre fois attractif, et quatre fois il aura cesse de l'être. Donc, enfin, la roue G aura tourné de quatre dents, et comme chaque dent correspond à une lettre, l'aiguille de la station d'arrivée aura marché exactement d'un même nombre de lettres que celle de la station de départ. Quant à la pièce S, représentée dans les deux figures, c'est une lame de cuivre, mobile sur une charnière, qui sert à interrompre où à fermer le courant, à volonté.

D'après ce qui précède, il est facile de se rendre compte comment on correspond d'un lieu à un autre. Supposons, par exemple, que le premier appareil (fig. 493) étant à Paris, le second au Havre, et la communication entre les deux stations étant établie par deux fils métalliques, on veuille transmettre, dans la dernière ville, le mot *signal :* les aiguilles correspondant, sur chaque appareil, à l'intervalle conservé entre les lettres A et Z, la personne qui envoie la dépêche fait avancer l'aiguille P jusqu'à la lettre S, où elle l'arrête pendant un temps très-court; l'aiguille de l'appareil qui est au Havre, reproduisant fidèlement les mouvements de l'aiguille de Paris, s'arrête à la même lettre, et alors la personne qui reçoit la dépêche note cette lettre. Celle qui est à Paris, continuant à tourner toujours dans le même sens, arrête l'aiguille à la lettre I, instantanément la seconde aiguille se fixe devant la même lettre; continuant de la même manière pour les lettres G, N, A, L, tout le mot est bientôt transmis au Havre.

Pour appeler l'attention de celui à qui on écrit, on adapte à la station d'arrivée une sonnerie qui doit être introduite dans le courant toutes les fois que la correspondance est suspendue. Une détente, mue par l'électro-aimant, fait partir cette sonnerie aussitôt que le courant passe, ce qui donne le signal qu'une dépêche va être transmise. De plus, chaque station doit être pourvue des deux appareils ci-dessus (fig. 493 et 494), sinon il serait impossible de répondre.

Nous avons supposé que le courant qui allait de Paris au Havre, dans un fil métallique, revenait de la même manière du Havre à Paris, dans un second fil. Or, le second fil est inutile : l'expérience a appris que, le pôle positif de la pile communiquant, à Paris, avec l'appareil, et le pôle négatif avec le sol, il suffit que le fil conducteur qui se rend au Havre soit mis, dans cette ville, en communication intime avec le sol. On admet, en général, que le circuit se trouve

alors fermé par la terre, dans laquelle le courant revient du Havre à Paris. Cette hypothèse est critiquée avec raison par M. l'abbé Moigno, dans son Traité de télégraphie électrique. Il est difficile, en effet, de concevoir qu'arrivé au Havre, le courant, qui tend par sa nature à se disperser dans toutes les directions, choisisse précisément celle qui le ramène à la pile d'où il est parti. M. Moigno admet que la terre, agissant ici comme réservoir, absorbe, aux deux extrémités libres des fils, les électricités que la pile y envoie, d'où résulte, dans le fil, le même courant continu que si ses deux extrémités se touchaient.

* 678. **Télégraphe électrique à signaux.** — Au lieu de télégraphes électriques à lettres, dans le genre de celui décrit ci-dessus (677), l'administration des lignes télégraphiques de France a d'abord adopté un télégraphe électrique dont les signaux sont les mêmes que ceux en usage depuis cinquante ans dans le télégraphe aérien de Chappe. Ce télégraphe, dont le principe est identique à celui du télégraphe à lettres, et qui a été construit par M. Breguet, se compose encore d'un *manipulateur* et d'un *récepteur* pour chaque station ; mais, dans chacun des appareils, le mécanisme est double, c'est-à-dire qu'il se compose réellement de deux manipulateurs et de deux récepteurs.

Sur le premier plan de l'appareil (fig. 497) sont deux colonnes de cuivre portant chacune un disque métallique à huit entailles, au centre duquel est une manivelle : chaque colonne, avec les pièces qu'elle porte, constitue un manipulateur. Sur le second plan est une boîte en acajou qui contient le récepteur dont le détail, que nous allons décrire d'abord, est représenté dans la figure 496. Sur la face antérieure de la boîte est appliquée une plaque blanche. Sur cette plaque est tracée une bande noire m, fixe, aux extrémités de laquelle sont deux leviers noirs mobiles x et y, destinés à servir d'*indicateurs* d'après l'angle qu'ils font avec le trait fixe m. Le mouvement de ces indicateurs n'est pas continu, mais s'effectue par intermittences de 45 en 45 degrés, en sorte que chacun d'eux peut occuper huit positions autour de son centre. Les huit positions d'un indicateur, combinées avec les huit positions de l'autre, donnent donc lieu à soixante-quatre combinaisons qui constituent autant de signaux. Toutefois, comme pour chaque indicateur, les deux signaux horizontaux tendent à se confondre, on n'a utilisé qu'une seule de ces positions, ce qui donne seulement, pour un même indicateur, sept signaux qui, combinés avec les sept de l'autre, font quarante-neuf signaux différents. Quant au mouvement des indi-

cateurs, il est produit pour chacun d'eux, par un mouvement d'horlogerie placé dans l'intérieur de la boîte, et par un électro-aimant, dont les bobines sont traversées par un courant qui arrive du lieu d'où l'on reçoit la dépêche. Nous supposerons que ce soit Paris, et que la ville où est le récepteur soit encore le Havre.

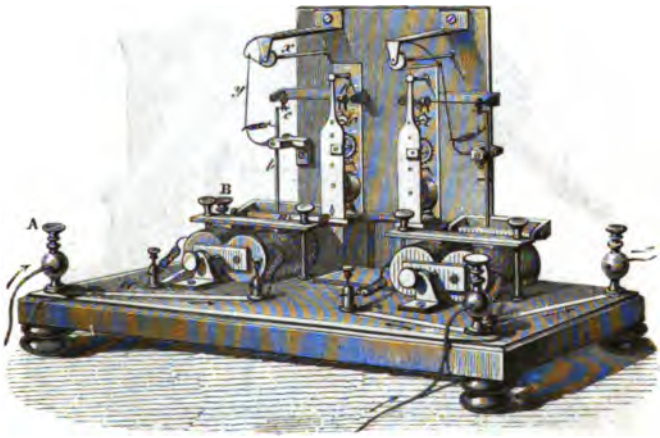


Fig. 496.

Cela posé, le courant qui vient de Paris, entrant en A (fig. 496), se rend, par une lame de cuivre *a*, dans un électro-aimant qui sert de moteur à l'un des indicateurs mobiles, soit à l'indicateur *x*, placé extérieurement sur la plaque blanche de la boîte (fig. 497). Toutes les fois que le courant passe dans l'électro-aimant, celui-ci attire une armature de fer doux *m* (fig. 496), qui transmet son mouvement à un levier *b* auquel elle est fixée; mais aussitôt que le courant ne passe plus, l'attraction de l'électro-aimant cessant, l'armature *m* est rappelée à sa première position par un ressort à boudin attaché à la partie supérieure du levier *b*. A chaque passage et à chaque interruption du courant, le levier *b* fait donc une oscillation. Or, celle-ci se transmet à une petite palette double *c*, fixée à un axe horizontal qui porte, à son autre extrémité, une palette semblable *k*, dont les deux branches sont un peu espacées l'une de l'autre dans le sens de l'axe, et font de plus entre elles un certain angle. Enfin, au-dessous de la palette *k* est une roue de rencontre *o*, à quatre

dents, qui est mue par un mouvement d'horlogerie représenté au-dessous de cette roue.

Ces transmissions de mouvement une fois connues, il est facile de se rendre compte comment le double mécanisme de la figure 496 imprime des déplacements successifs de 45 degrés aux indicateurs x

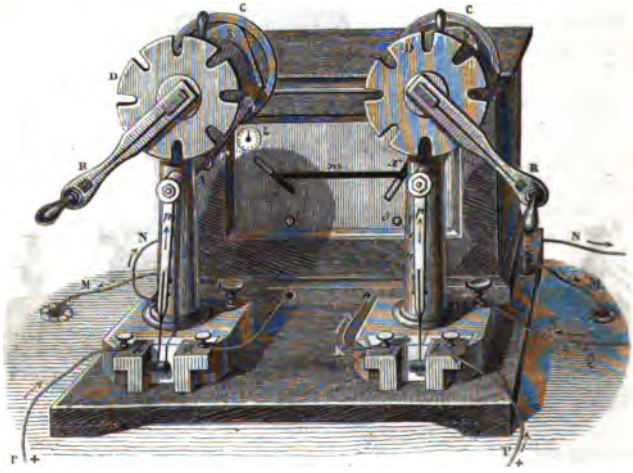


Fig. 497.

et y de la figure 497, ces indicateurs étant fixés, l'un à la roue de rencontre de l'un des mécanismes, l'autre à celle du second. En effet, le courant ne passant pas, une dent de la roue o bute contre la branche de droite de la palette k, et la roue ne peut tourner; tandis qu'aussitôt que le courant passe, la palette oscille et la roue de rencontre se met à tourner, mais *seulement d'une demi-dent*, ou de 45 degrés, parce que la dent suivante vient maintenant buter contre la seconde branche de la palette. A un second mouvement du levier b, lequel se produit aussitôt que le courant est interrompu, la première branche de la palette revient à sa position initiale et arrête une seconde fois la dent qui vient d'être arrêtée par l'autre branche, et ainsi de suite successivement pour chaque dent, d'où résultent les arrêts successifs des roues de rencontre et des indicateurs x et y, de 45 en 45 degrés.

Tout ce que nous venons de dire se passe au lieu d'arrivée de la dépêche, que nous avons supposé être le Havre. Il nous reste à faire

connaître comment se produisent, au point de départ, les intermittences du courant, au moyen du manipulateur. Pour cela, reportons-nous à la figure 497, et ne considérons qu'un des deux manipulateurs, celui de gauche. Le courant d'une pile, arrivant par le fil P, gagne une pièce métallique *b*, qui est isolée du reste de l'appareil par une plaque d'ivoire, mais qui, momentanément, peut être en contact, comme cela a lieu dans le dessin, avec un petit marteau métallique fixé à la partie inférieure du levier *p*. Le courant, montant alors par ce levier, redescend par la colonne, d'où il passe dans le fil N, qui le conduit jusqu'à l'électro-aimant du récepteur placé au Havre, ce fil allant, sans solution de continuité, de la station de départ à la station d'arrivée. Quant aux interruptions du courant, on les obtient en faisant osciller le levier *p*, au moyen d'une manivelle R et de différentes pièces placées au haut de la colonne. La première de ces pièces est un plateau circulaire D, qui est fixe, et sur le contour duquel sont huit entailles dans lesquelles s'engage successivement une dent d'acier placée à la partie postérieure de la manivelle, à mesure qu'on la tourne. Ces entailles, qui divisent la circonférence du plateau en huit arcs égaux de 45 degrés, servent à régler la course de la manivelle de 45 en 45 degrés. Cela posé, lorsqu'on tourne la manivelle, son mouvement se transmet à un second plateau C, sur lequel est appliqué en saillie un excentrique S. Sur cet excentrique s'appuie un galet *v*, qui sert de guide à un levier mobile *r*. Celui-ci, oscillant alternativement à droite et à gauche, par l'effet de la pression que l'excentrique exerce sur le galet, transmet son mouvement à l'axe A, au levier *p* et au petit marteau oscillant; d'où il résulte, d'après la forme de l'excentrique, que pendant une révolution complète de la manivelle, ce petit marteau frappe quatre fois la pièce *b* et quatre fois la pièce *a*, et que, par suite, le courant passe quatre fois et est interrompu quatre fois dans l'électro-aimant du récepteur qui est au Havre. Donc le levier *b* (fig. 496) fait huit oscillations, et l'indicateur *x*, qui lui correspond, huit mouvements de 45 degrés chacun.

Quant au récepteur de Paris, il marche de la même manière, au moyen du courant qui vient du Havre, mais, dans ce cas, le petit marteau oscillant doit toucher la pièce *a*. Le courant arrivant alors du Havre par le fil N, monte dans la colonne, descend par le levier *p*, passe sur la pièce *a*, et de là est conduit par un fil de cuivre à l'électro-aimant qui est dans la boîte.

Deux clefs *o o* servent à monter les mouvements d'horlogerie, et deux cadrans *z*, dont un seul est visible dans le dessin, servent

à faire tourner une poulie x (fig. 496), afin de régler, à l'aide d'un fil, le ressort à boudin qui agit sur le levier b.

* 679. **Télégraphe à touches.** — Pour faciliter la manœuvre du télégraphe à cadran décrit plus haut (677), on y a adapté des touches semblables à celles des pianos et portant chacune une lettre de l'alphabet; ces touches servent à interrompre le courant ou à le laisser passer. A l'aide de ce mécanisme, une personne, qui a un peu d'habitude, parvient à transmettre les mots avec une grande rapidité.

La figure 498 montre un appareil de ce genre inventé et construit par M. Froment, et marchant avec une extrême précision. Cet appareil remplit en même temps les fonctions de manipulateur et de récepteur à l'une des extrémités de la ligne télégraphique, et un second appareil entièrement semblable remplit les mêmes fonctions à l'autre extrémité. Supposons, par exemple, que le premier appareil étant à Paris, le deuxième soit à Rouen, et que la communication soit établie entre les deux stations par deux fils métalliques.

Cela posé, l'appareil représenté dans la figure 498 étant à Paris, le courant de la pile entre en b, traverse l'appareil, dans lequel il est interrompu, à volonté, à l'aide des touches et d'un mécanisme que nous allons décrire ci-après, puis sort en b' et se rend au récepteur de Rouen. Ce récepteur consiste, à Rouen comme à Paris. en un cadran vertical A, portant 26 lettres, une croix et une flèche, de même que les 28 touches. Dans la caisse sur laquelle est ce cadran est un électro-aimant qui, par un mécanisme analogue à celui décrit dans la figure 495, transmet le mouvement à une aiguille mobile sur le cadran. Enfin, derrière la caisse est un timbre d'horlogerie C, sur lequel frappe un petit marteau mû par un électro-aimant spécial, qui reçoit le courant avant qu'il passe dans l'électro-aimant de l'aiguille. Cette transmission du courant, dans l'un ou l'autre électro-aimant, s'opère à l'aide du manipulateur que nous allons décrire.

Celui-ci se compose d'abord de 28 touches mobiles en ivoire; sur la première est une croix, sur la dernière une flèche, sur les autres les 26 lettres de l'alphabet. Enfin, les touches des dix premières lettres portent encore les dix chiffres de la numération décimale.

Au delà des touches, sur un plateau de bois horizontal, on voit un cadran B et deux petites pièces m et n, qui sont mobiles et qui, à l'aide d'une poignée, peuvent être mises en communication avec des contacts s et r, q et p. Le cadran B n'est qu'un vérificateur; son aiguille doit toujours indiquer la même lettre que la dernière

touche qu'on vient de faire marcher; s'il n'en est pas ainsi, l'appareil a mal fonctionné, et il y a erreur dans la transmission de la dépêche. Quant aux pièces *m* et *n*, voici leur usage : en contact avec *s*, la pièce *m* sert à la transmission de Paris à Rouen; en con-

Fig. 498.

tact avec *r*, elle sert à recevoir la dépêche de Rouen à Paris, en faisant marcher l'aiguille du cadran A. De même la pièce *n*, en contact avec *q*, sert à indiquer les signaux, c'est-à-dire à faire sonner le timbre de Rouen; en contact avec *p*, elle reçoit les signaux d'appel, c'est-à-dire fait marcher l'électro-aimant du timbre C par le courant qui arrive de Rouen; c'est le signal qu'une dépêche va être transmise. Toutes les pièces visibles dans la figure 498 étant décrites, il nous reste à faire connaître le mécanisme intérieur que les touches servent à faire marcher.

Ce mécanisme, représenté sur une plus grande échelle dans la figure 499, se compose d'une plaque de cuivre V qui porte un mouvement d'horlogerie P et les touches. Pour ne pas masquer le dessin, on n'a représenté que quatre touches, celles qui portent les

lettres C, D, Q, R. Le mouvement d'horlogerie, par une suite de roues d'engrenage, tend à faire tourner la roue *r* et l'arbre horizontal *a*, mais à cet arbre est fixée une roue à rochet G, en prise avec un encliquetage *m*, et ne pouvant tourner que lorsque celui-ci est soulevé. Pour cela, la pièce *m* est liée à une lame horizontale *n*, qui, toutes les fois qu'elle descend, fait tourner l'encliquetage *m* autour d'un point d'appui, et rend libre la roue G. Cette lame *n*,

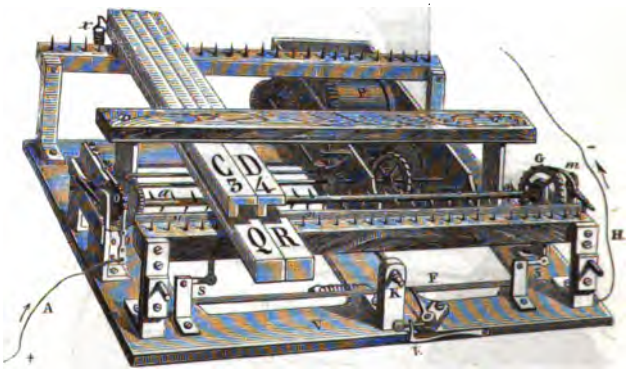


Fig. 499.

qui reçoit son mouvement des touches, forme parallélogramme avec une seconde tige F, à l'aide d'articulations SS, ce qui fait qu'elle ne peut descendre que parallèlement à elle-même. Quand les touches n'agissent plus sur la lame *n*, un ressort E, réagissant sur la tige F, fait remonter la lame.

Cela posé, le courant de la pile arrivant par le fil A, gagne une lame métallique *i*, isolée sur un montant d'ivoire. Cette lame *i* est en contact avec une roue O à 28 dents; quand elle touche une dent, le courant passe dans la roue O, qui est métallique, et de là dans tout l'appareil, entièrement en métal, pour sortir par le fil H, et gagner la ligne télégraphique jusqu'à Rouen; mais quand la lame *i* ne touche pas les dents, le courant ne passe pas, en sorte que pendant une révolution complète de la roue O, le courant passe 28 fois et est interrompu 28 fois, d'où il résulte qu'à Rouen l'électro-aimant du récepteur a fait marcher l'aiguille sur son cadran de 28 divisions.

Il ne nous reste donc plus qu'à expliquer comment, à l'aide des touches, on obtient le nombre d'interruptions nécessaire pour faire

avancer l'aiguille du récepteur de Rouen d'un nombre de lettres déterminé, par exemple, de E à N. A cet effet, au-dessous des touches est une verge horizontale *aa*, d'acier, sur laquelle sont implantées 28 dents ou cammes, aussi d'acier, l'entourant en hélice comme le filet d'une vis, et divisant la circonférence de la verge en 28 arcs égaux, comme le font les dents de la roue O. Enfin, au-dessous des 28 touches, sur une rangée rectiligne parallèle à la verge *a*, sont fixées des pointes d'acier, au nombre de 28 en tout, et correspondant chacune à une dent de la verge *a*. Ces pointes butent contre les dents de la verge quand les touches sont abaissées, mais quand celles-ci sont relevées, les dents passent librement, en sorte que la verge peut être arrêtée en 28 points différents de sa rotation entière, par le moyen de la pression des 28 touches.

Il est maintenant facile de se rendre compte du jeu de l'appareil. Veut-on, par exemple, transmettre une dépêche de Paris à Rouen; on commence par tourner la pièce *n* (fig. 498) sur le contact *q*, puis abaissant une touche quelconque, le courant passe et va faire résonner la sonnerie de Rouen, qu'on tient toujours prête à recevoir le signal d'appel. Ramenant alors la pièce *n* sur le contact *p*, qui conduit le courant à l'électro-aimant de la sonnerie C, on attend que Rouen la fasse sonner, c'est le signal qu'on est prêt à recevoir. Alors la personne qui est à Rouen place la pièce *m* sur le contact *r*, et celle de Paris place la même pièce sur le contact *s*, qui sert à la transmission. Cela posé, supposons qu'il s'agisse d'écrire le mot FRANCE, on appuie sur la touche F, et l'enclique-tage *m* (fig. 499) se trouvant soulevé, le mouvement d'horlogerie fait tourner la roue G et la verge *a* jusqu'à ce que la dent de la verge, qui correspond à cette touche, vienne buter contre l'arrêt qui est au-dessous. Or, la lettre F étant la sixième, la roue O a tourné de six dents, d'où il résulte que six fois le courant a passé, et six fois il a été interrompu, et que par suite l'électro-aimant de Rouen a fait avancer l'aiguille de six lettres. Cette aiguille, qui était d'abord sur la croix, est donc maintenant sur la lettre F. Abaissant actuellement, à Paris, la touche R, la roue O tourne de douze dents, et l'aiguille de Rouen avance de douze lettres, c'est-à-dire s'arrête à R, et ainsi de suite pour tout le mot. A la fin de chaque mot, on abaisse la touche marquée d'une croix.

Pour transmettre des nombres en chiffres, on abaisse d'abord la touche marquée d'une flèche, puis successivement les touches qui portent les chiffres à transmettre, et on abaisse la touche marquée d'une croix pour indiquer qu'on a fini le nombre.

* 680. **Télégraphe électrique écrivant de Morse.** — Les télégraphes à cadran et à signaux décrits ci-dessus ne laissent aucune trace des dépêches transmises, et si quelques erreurs ont été commises en copiant les signaux, on n'a aucun moyen de les contrôler. Ces inconvénients n'existent pas dans les *télégraphes écrivants*, qui tracent eux-mêmes les signaux sur une bande de papier, à mesure qu'ils sont transmis.

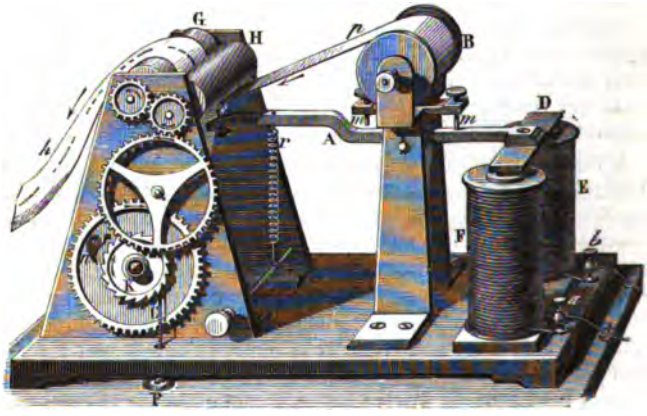


Fig. 500.

Il existe plusieurs télégraphes de ce genre. Nous décrirons d'abord le télégraphe écrivant de M. Morse, dont l'usage est très-répandu dans l'Amérique du Nord, et dont la disposition est fort simple.

La figure 500 représente l'appareil qui reçoit les dépêches et les écrit; le moteur qui le fait fonctionner est encore, comme dans les télégraphes déjà décrits, un électro-aimant E, en communication avec deux fils *a* et *b*, qui le mettent en rapport avec la station de départ. Quand le courant passe dans le fil de l'électro-aimant, celui-ci attire une armature de fer doux D, qui transmet le mouvement à un levier A; mais aussitôt que le courant ne passe plus, l'action de l'électro-aimant est détruite, et un ressort à boudin *r* rabat le levier. Les oscillations de celui-ci sont réglées par deux vis *m* qu'on abaisse plus ou moins. Enfin, le levier A porte, à son extrémité, un poinçon d'acier *o*, qui remplit la fonction de crayon pour écrire les signaux. Pour cela, une bande de papier *ph* est

d'abord enroulée sur un cylindre de bois B, et vient s'engager ensuite entre deux cylindres G et H, tournant en sens contraire, et faisant ainsi l'office de laminoir pour entraîner la bande de papier dans le sens des flèches. Quant au mouvement de ces cylindres, il est produit par une suite de roues dentées mues par un poids P, lequel est fixé à une corde C qui s'enroule sur un barillot K.

Cela posé, le cylindre H étant garni d'une substance élastique, comme de la gutta-percha ou du caoutchouc, toutes les fois que l'électro-aimant fonctionne, le poinçon *o* vient frapper le papier, et, sans le trouer, y produit une empreinte dont la forme varie suivant le temps que le poinçon est resté en contact avec le papier. S'il ne fait que frapper instantanément, il ne produit qu'un trait court (-); mais si le contact a une certaine durée, il se produit une ligne plus ou moins allongée (—). On peut donc, en faisant, à la station de départ, passer le courant pendant un intervalle plus ou moins long, produire à volonté, à la station d'arrivée, un trait ou une ligne, et, par conséquent, des combinaisons de traits et de lignes. Il restait à donner à ces combinaisons une signification déterminée. C'est ce qu'on a fait en représentant les lettres de l'alphabet par les combinaisons suivantes :

Un trait et une ligne (- —) donnent la lettre.	A.
Une ligne est trois traits (— - - -).....	B.
Trois traits (- - -).....	C.
Une ligne et deux traits (— - -).....	D.

Et ainsi de suite, ce qui permet d'écrire des mots et des phrases. On a soin de laisser, entre chaque lettre, un intervalle blanc, comme le montre le dessin.

Le télégraphe écrivant de M. Morse, adopté successivement en Amérique, en Autriche, en Prusse et en Suisse, l'a été récemment sur les lignes télégraphiques françaises. Cependant, on ne peut disconvenir que le manipulateur de ce télégraphe ne laisse quelque chose à désirer, la manœuvre en étant tout à fait arbitraire et dépendant uniquement de l'habileté de l'employé; d'où peut résulter une grande irrégularité dans la transmission des signaux. M. Morse lui-même a fait de nombreuses tentatives pour perfectionner son manipulateur. Mais c'est M. Paul Garnier qui vient, le premier, de donner au manipulateur de M. Morse la régularité qui lui manquait.

Le manipulateur de M. Garnier consiste en un cylindre de cuivre, de 18 centimètres de diamètre sur 25 de longueur, et monté sur

un axe dont une extrémité porte une vis à pas rapide engagée dans un écrou fixe. Par suite, en imprimant au cylindre un mouvement de rotation, il prend en même temps un mouvement de translation dans le sens de son axe. Or, sur le contour du cylindre est tracée une ligne héliçoïdale, le long de laquelle sont pratiquées 1700 petites ouvertures longitudinales parallèles à l'axe du cylindre. Dans chaque ouverture est engagée, à l'aide d'une tige, un petit cube de cuivre faisant saillie de 2 millimètres sur la surface du cylindre. Les dimensions de ces cubes sont telles que, placés sur la ligne héliçoïdale, ils se touchent tous et présentent un filet continu qui s'enroule sur le cylindre. Mais si quelques-uns sont déviés dans le sens des ouvertures longitudinales parallèles à l'axe du cylindre, il en résulte que le filet est interrompu, présentant des solutions de continuité où l'on veut et autant qu'on le veut.

Cela posé, si l'on conçoit que la pièce qui transmet le courant, vienne s'appuyer sur les petits cubes qu'on vient de décrire, toutes les fois que cette pièce rencontrera un cube, le poinçon tracera un point; et lorsqu'elle rencontrera deux cubes consécutifs, le poinçon tracera une ligne. Il n'y aura donc qu'à disposer d'avance les cubes sur le cylindre de manière à leur faire transmettre la combinaison de points et de lignes qui représente la dépêche. En un mot, il faudra d'abord *composer* celle-ci ; d'où le nom de *rouleau-compositeur* donné au manipulateur de M. Garnier. La dépêche une fois composée, le rouleau est mis en contact, par sa surface, avec la pièce qui transmet le courant, et, par son axe, avec un mouvement d'horlogerie qui le fait tourner, et la dépêche est transmise.

* 681. **Télégraphe électro-chimique enregistreur de M. Bain.** — Les *télégraphes électro-chimiques* sont des appareils qui inscrivent les dépêches en signes colorés sur un papier imprégné de cyanure jaune de fer et de potassium, ce sel étant décomposé par le courant de la pile toutes les fois qu'il passe au travers du papier.

Le premier télégraphe de ce genre est dû à M. Bain, Écossais. Les lettres y sont représentées à l'aide des mêmes signes que dans le télégraphe de Morse, c'est-à-dire par des combinaisons de traits et de points; mais la dépêche doit d'abord être *composée* sur une longue bande de papier ordinaire. Pour cela, celle-ci est percée, à l'emporte-pièce, successivement de petits trous ronds qui représentent les points de Morse, et de trous allongés qui correspondent aux traits. Cela fait, la bande de papier est interposée entre une petite roulette métallique et une lame élastique également mé-

tallique, qui font partie l'une et l'autre du courant allant de la station de départ à la station d'arrivée. Or, la roulette, en tournant, entraîne avec elle la bande de papier, dont toutes les parties viennent successivement passer entre la roulette et la lame. Par suite, si la bande de papier n'était pas trouée, elle s'opposerait constamment au passage du courant, n'étant pas conductrice; mais en vertu des trous qu'on y a pratiqués, chaque fois que l'un d'eux passe, il y a contact entre la roulette et la lame, et le courant se continue pour aller tracer en bleu, sur un disque de papier imprégné de cyanure, la même série de points et de traits que sur la bande de papier découpé, ainsi qu'on va s'en rendre compte sur le récepteur du télégraphe décrit ci-après.

* 682. **Télégraphe électro-chimique enregistreur de M. Pouget-Maisonneuve.** — M. Pouget-Maisonneuve, chef du matériel des lignes télégraphiques, a modifié le télégraphe de M. Bain, en supprimant la *composition* de la dépêche et en imbibant d'azotate d'ammoniaque le papier sur lequel elle s'imprime, ce qui le rend hygrométrique et lui conserve l'humidité nécessaire pour qu'il conduise le courant; il a de plus adapté à l'appareil un paratonnerre destiné à préserver les expérimentateurs des étincelles foudroyantes que peuvent donner les fils des télégraphes électriques, pendant les temps d'orage.

La figure 502 représente le récepteur du télégraphe de M. Pouget-Maisonneuve, et la figure 501, le manipulateur, appareils construits par M. Molteni, fabricant à Paris. Le manipulateur se compose d'une petite planchette d'acajou de 9 centimètres de longueur, sur laquelle est adaptée une touche T, en ivoire, portée par une lame d'acier *o;* celle-ci est elle-même vissée sur une pièce métallique dans laquelle s'engage, au moyen d'une vis de pression, un fil de cuivre A, en communication avec le pôle positif de la pile qui doit faire marcher le récepteur au lieu où l'on envoie la dépêche. Cela posé, le courant entrant en A, suit la lame d'acier *o*, et de là s'arrête à une pièce *m*, ne trouvant aucun conducteur pour se propager plus loin; mais si l'on appuie alors sur la touche T, la lame d'acier est mise en contact avec une petite tige métallique *n*, fixée sur une pièce de même matière, dans laquelle s'engage le fil B destiné à conduire le courant au récepteur. Le courant passe donc alors, et suivant qu'on presse sur la touche pendant un seul instant, ou pendant un intervalle plus prolongé, le courant va passer, pendant une durée égale, dans le récepteur et y produire les effets que nous allons décrire :

Commençons par observer que, dans le télégraphe de M. Pouget-Maisonneuve, ce n'est pas le *courant de la ligne*, c'est-à-dire celui arrivant du manipulateur, qui agit sur le papier au cyanure, mais bien un *courant local* fourni par une pile placée près du récepteur; en sorte que le courant de la ligne n'a d'autre usage que d'interrompre ou de laisser passer, à volonté, le courant local. Cela posé, le courant local entrant par le fil B (fig. 502), gagne un bâti métallique C, dans lequel est un mouvement d'horlogerie qui se monte par une clef K, et qui est destiné à imprimer à un petit cylindre d'ivoire *a* un mouvement de rotation uniforme. De

Fig. 501.

ce bâti le courant passe dans une lame de fer D, qui s'appuie sur une bande de papier *ph*, enroulée d'un bout en un rouleau H, et de l'autre bout se déroulant au moyen du cylindre *a* et d'un petit rouleau placé au-dessus, lesquels pincent le papier en tournant en sens contraire.

Ce papier a été préalablement trempé dans une dissolution contenant, pour 100 grammes d'eau, 150 grammes d'azotate d'ammoniaque et 5 grammes de cyanure jaune de fer et de potassium, l'azotate d'ammoniaque ayant pour but, comme nous l'avons dit ci-dessus, de conserver le papier suffisamment humide pour qu'il conduise le courant. Par suite, toutes les fois que le courant descend par la lame D, il traverse le papier, et décomposant le cyanure double de fer et de potassium, il y a, au contact de la lame, production de bleu de Prusse, qui donne, de *p* en *h*, des traits ou des points bleus, selon la durée de l'action électro-chimique.

Après avoir traversé le papier, le courant passe sur un anneau de platine *i*, qui entoure le cylindre d'ivoire *a*; de là, descendant par la colonne *e*, il est conduit par une longue lame de cuivre jusqu'en *r*, où il monte dans un fil de cuivre *g* enroulé en hélice, et arrive enfin à une tringle horizontale *c*, qui peut osciller, de

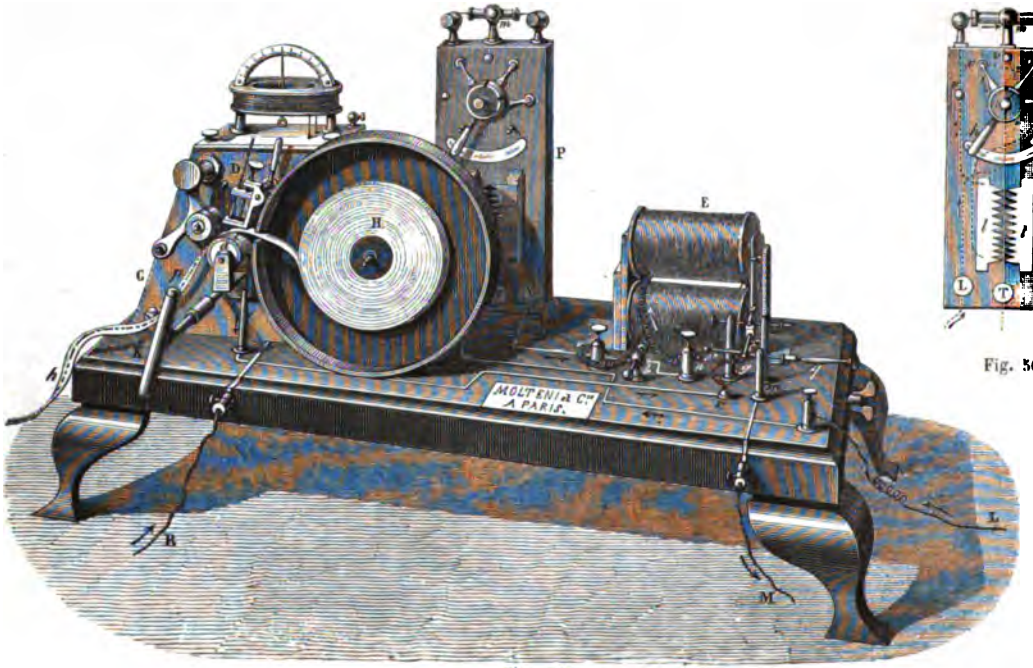


Fig. 502.

Fig. 503.

droite à gauche et de gauche à droite, entre les extrémités de deux tiges horizontales *q* et *o'*, perpendiculaires à la tringle *c*. Or, le courant ne peut continuer à se propager qu'autant que la tringle *c* est en contact avec la pointe de la tige *q*, car alors il descend par la borne *m* et revient à la pile par le fil M.

Dans le dessin, la tringle *c* est en contact avec la pointe de la tige *o'*, et par suite le courant local est interrompu. Il nous reste donc à faire connaître comment la pièce *c* peut successivement venir en contact avec les pointes des tiges *q* et *o'*. Or, c'est le courant venant du manipulateur qui produit ces oscillations. En effet, ce courant entrant en L, gagne une boîte rectangulaire P, dans un but que nous décrirons ci-dessous; en sort en A pour se rendre à la borne *n*, d'où il va passer dans un électro-aimant E; puis sort de celui-ci par un fil qui le conduit à la borne *o*, laquelle communique au sol en dessous de l'appareil, et conduit enfin le courant jusqu'à la terre, où il va se perdre, de même que dans les télégraphes déjà décrits (678 et 679). Cela posé, toutes les fois que le courant de la ligne passe dans l'électro-aimant E, celui-ci attire une armature de fer doux qui fait osciller la tringle *c* et la met en contact avec la pointe de la tige *q*, ce qui ferme le courant local; au contraire, quand le courant de la ligne ne passe pas dans l'électro-aimant, l'armature de celui-ci en étant écartée par un petit ressort, la tringle *c* oscille à gauche vers la tige *o'*, ce qui interrompt le courant local. On voit donc que c'est la personne qui fait manœuvrer le manipulateur, au point de départ, qui, à volonté, ferme ou interrompt le courant local du récepteur, et fait ainsi apparaître sur le papier *ph* les combinaisons de traits et de points qui représentent la dépêche.

Quant à la boîte rectangulaire P, dans laquelle se rend d'abord le courant de la ligne, elle est destinée à servir de paratonnerre dans le cas où, par l'influence de l'électricité atmosphérique, les fils conducteurs pourraient donner des étincelles dangereuses. Le paratonnerre consiste en deux pièces de cuivre dentées *t* et *l* (fig. 503), la première étant en communication avec la terre par une chaîne métallique, et la seconde se trouvant dans le courant qui entre en L, comme le montrent les lignes ponctuées figurées dans le dessin. D'après le faible intervalle des deux pièces dentées, toutes les fois que le courant qui passe en *l* acquiert une forte tension, il agit par influence sur le sol par l'intermédiaire de la pièce *t*, et se décharge par les pointes, sans aucun danger pour ceux qui sont auprès de l'appareil.

Un fil fin *m*, de métal, dans lequel passe le courant de la ligne, sert aussi de paratonnerre. En effet, quand le courant, par la cause indiquée ci-dessus, prend une trop grande intensité, ce fil s'échauffe assez pour fondre, et par suite le courant ne passe plus.

La pièce *hxyz*, mobile sur son centre *n* (fig. 503), sert à régler le passage du courant de la ligne. Lorsque la poignée *h*, qui est d'ivoire, est tournée à gauche, comme dans le dessin, le courant passe dans l'électro-aimant et dans le paratonnerre; si, au contraire, elle est tournée à droite, le courant passe encore dans l'électro-aimant, mais ne passe plus dans le paratonnerre; enfin, si la poignée est verticale, le courant de la ligne ne passe plus du tout dans le récepteur.

Après avoir fait connaître la construction et la manipulation du télégraphe de M. Pouget-Maisonneuve, nous ajouterons que M. Liais a observé récemment qu'il y a avantage à remplacer la lame de fer D (fig. 502) par une lame semblable de cuivre. On obtient alors, sur la bande de papier, des traces rouges au lieu de traces bleues, ce qui ne change rien aux signaux, mais on a l'avantage que la réaction chimique peut alors se produire avec un courant excessivement faible, ce qui permet de supprimer le courant local, et de ne faire usage que du courant de la ligne pour passer en même temps dans l'électro-aimant et au travers du papier au cyanure.

* 683. **Télégraphe solaire.** — Quoique le *télégraphe solaire* soit seulement fondé sur l'emploi des rayons solaires pour la transmission des signaux, et ne fasse nullement usage des courants électriques, nous croyons devoir le donner ici pour compléter ce qui précède sur les télégraphes.

Cet appareil, inventé par M. Leseurre, fonctionnaire du service télégraphique, en Algérie, se compose de deux miroirs plans et elliptiques M et N (fig. 504), portés sur un support commun K, et pouvant prendre respectivement différentes inclinaisons sur leurs axes. Tout le système est posé sur un pied de bois à six branches, et muni de deux lunettes E et L, qui servent à diriger le faisceau solaire réfléchi par le miroir N, vers le lieu où il s'agit de transmettre une dépêche. Pour cela, on commence par orienter la longue pièce de fonte K parallèlement à l'axe de la terre, ce qui s'obtient au moyen d'un niveau à bulle d'air D, d'une petite boussole placée au-dessous, et d'un demi-cercle gradué S qui sert à mesurer l'angle *t*, lequel doit être le complément de la latitude du lieu. On incline ensuite le miroir M de manière que le faisceau solaire AB, après s'être réfléchi sur ce miroir, devienne parallèle au sup-

port K et par suite à l'axe de la terre, ce qu'on reconnaît quand une portion du faisceau passe dans les ouvertures de deux petits écrans fixés sur le support; il suffit alors, pour faire suivre au

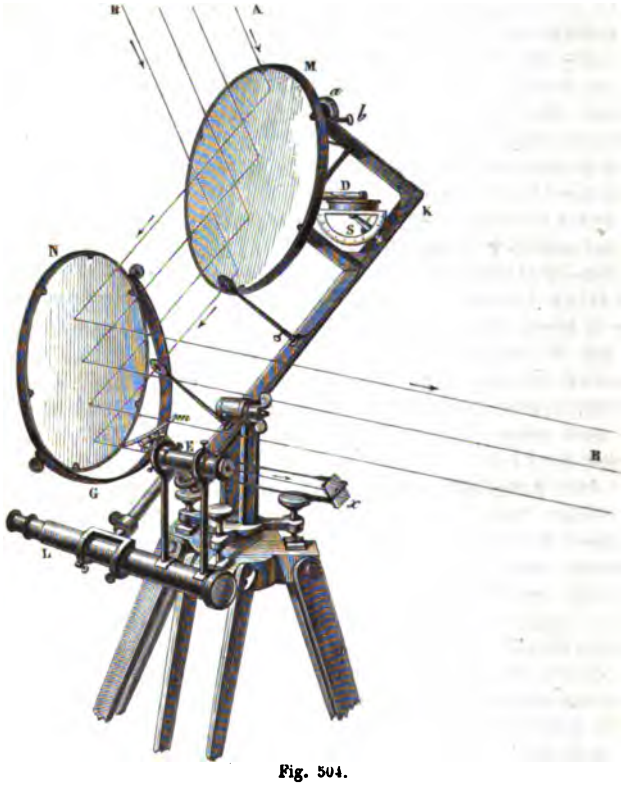


Fig. 504.

miroir M la marche apparente du soleil, de tourner une vis de rappel *b*, qui engrène dans un pignon *a* dont l'axe transmet le mouvement au miroir.

Il ne reste plus qu'à donner au second miroir N l'inclinaison convenable pour que le faisceau soit renvoyé dans la direction voulue. A cet effet, on dirige la lunette L vers le lieu avec lequel il s'agit de correspondre. Une lunette E, montée sur la première,

à la manière d'un chercheur (467), la suit dans son mouvement, et l'on est prévenu que le faisceau R est parallèle à l'axe optique de la lunette L, quand les rayons réfléchis qui passent dans la lunette E viennent projeter, au centre d'un écran x, l'image du soleil. Le faisceau R étant alors transmis dans la direction demandée, il reste à lui donner des intermittences qui puissent être interprétées comme signaux. Pour cela, on a adopté l'alphabet déjà en usage dans le télégraphe de Morse, les signaux étant composés d'une combinaison d'*éclairs brefs* et d'*éclairs longs*, qui correspondent, les premiers, aux points de Morse, et les seconds, aux traits. Le miroir N étant ordinairement écarté de la position d'éclair par un ressort, on produit un éclair bref en appuyant avec le doigt, pendant un temps très-court, derrière le miroir, et un éclair long en prolongeant la pression. L'amplitude d'écart du miroir N est réglée au moyen d'un arc m, fixé au cadre du miroir et portant une pièce coudée n qui est fendue, dans une partie de sa longueur, d'une rainure où s'engage une petite tige fixe adaptée au support G. La pièce coudée n bute, à ses deux bouts, contre cette tige, et limite ainsi la course du miroir quand il est pressé par la main, puis quand la pression cesse il est rappelé par un ressort.

Le télégraphe de M. Leseurre est très-portatif, peut être installé en quelques minutes et peut mettre en communication rapide des postes distants de 20 lieues les uns des autres. Enfin, des observations faites à Paris, entre les tours de Saint-Sulpice et de Montlhéry, ont donné les résultats les plus satisfaisants. L'appareil représenté dans la figure 504 a été construit par M. Molteni.

* 684. **Horloges électriques.** — Les horloges électriques sont des mouvements d'horlogerie dont un électro-aimant, au moyen d'un courant électrique successivement interrompu, est en même temps le moteur et le régulateur. La figure 505 représente le cadran d'une semblable horloge, et la figure 506 le mécanisme qui fait marcher les aiguilles.

Un électro-aimant B attire une pièce de fer doux P, mobile sur un pivot a. La pièce P transmet son mouvement de va-et-vient à un levier s, qui, au moyen d'un rochet n, fait tourner la roue A. Celle-ci, par le pignon D, fait tourner la roue C, laquelle par une suite de roues et de pignons, fait marcher les aiguilles. La petite marque les heures, la grande les minutes; toutefois, comme cette dernière ne marche pas d'une manière continue, mais par sauts brusques, de seconde en seconde, il s'ensuit qu'on la fait aussi servir à marquer les secondes.

Il est evident que la régularité du mouvement des aiguilles dépend de la régularité des oscillations de la pièce P. Or, avant de passer dans l'électro-aimant B, les intermittences du courant sont réglées par une première horloge étalon, réglée elle-même par un pendule à secondes. A chaque oscillation du pendule, le courant passe une fois et s'interrompt une fois; d'où il résulte que la pièce P bat exactement la seconde.

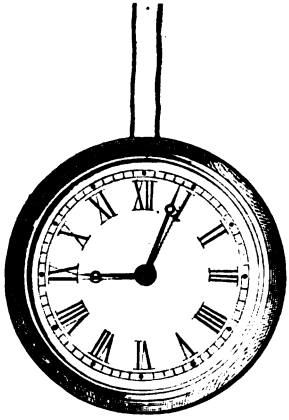


Fig. 505.

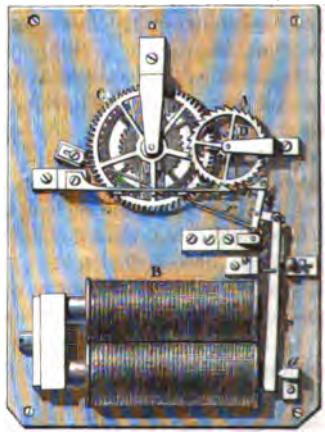


Fig. 506.

Cela posé, voici l'usage de ces horloges : supposons que sur le chemin de fer de Paris à Bordeaux toutes les stations possèdent une horloge semblable à celle qui vient d'être décrite; et que dans la gare de Paris soit une horloge étalon dont parte un fil conducteur se rendant à toutes les horloges de la ligne jusqu à Bordeaux. En faisant passer un courant dans ce fil, toutes ces horloges marqueront instantanément la même heure, la même minute, la même seconde; car on verra bientôt que l'électricité de la pile, dans les fils métalliques, parcourt environ 43 mille lieues par seconde, vitesse qui rend inappréciable le temps que le courant met à se propager de Paris à Bordeaux.

* 685. **Moteurs électro-magnétiques.** — On a fait de nombreuses tentatives pour utiliser la force attractive des électro-aimants comme force-motrice dans les machines. La figure 507 représente une machine de ce genre construite par M. Froment. Elle se com-

pose de quatre électro-aimants puissants A, B, C, D, fixés sur un bâti de fonte X. Entre ces électro-aimants est un système de deux roues de fonte, mobiles sur un même axe horizontal, et portant sur leur contour huit armatures de fer doux M.

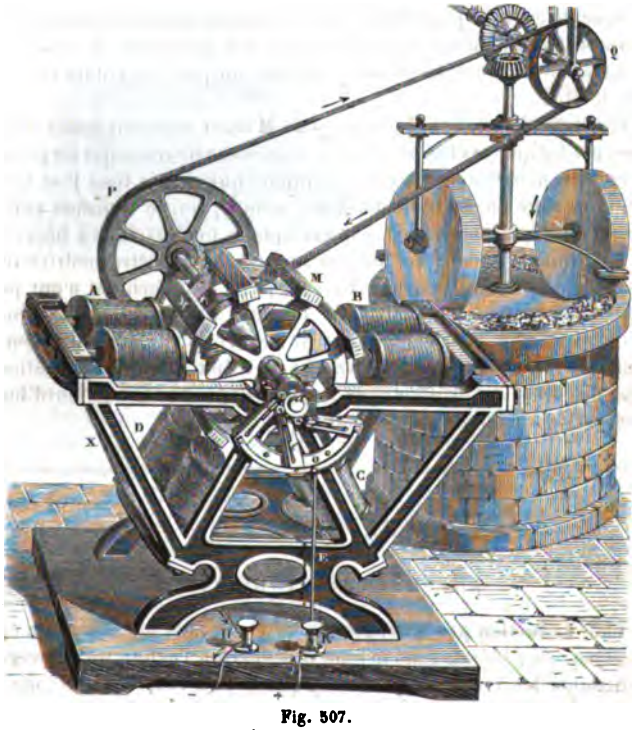


Fig. 507.

Le courant de la pile arrive en K, monte dans le fil E et gagne un arc metallique O, qui sert à faire passer le courant successivement dans chaque électro-aimant, de manière que les attractions sur les armatures M ne se contrarient pas, mais soient toutes de même sens. Or, cette condition ne peut être satisfaite qu'autant que le courant s'interrompt, dans chaque électro-aimant, au moment même où une armature arrive en présence des axes des bobines. Pour obtenir cette interruption, l'arc O porte trois branches *e* ter-

minées chacune par une lame d'acier à laquelle est fixée une petite poulie. Deux de ces poulies établissent la communication respectivement avec un électro-aimant, la troisième avec deux. Une roue centrale *a* porte des cammes sur lesquelles s'appuient alternativement les poulies. Toutes les fois que l'une d'elles porte sur une camme, le courant passe dans l'électro-aimant correspondant, mais cesse de passer aussitôt que le contact n'a plus lieu. A sa sortie des électro-aimants, le courant revient au pôle négatif de la pile par le fil H.

Par cette disposition, les armatures M étant successivement attirées par les quatre électro-aimants, le système de roues qui les porte prend un mouvement de rotation rapide qui, par la roue P et une courroie sans fin, se transmet à la poulie Q, qui le transmet enfin à une machine quelconque, par exemple, à une machine à broyer.

M. Froment a dans ses ateliers une machine électro-motrice de la force d'un cheval-vapeur. Mais jusqu'ici ces machines n'ont pu être appliquées à l'industrie, la dépense des acides et du zinc qu'elles consomment l'emportant de beaucoup sur celle du combustible dans les machines à vapeur de même force. L'application des machines électro-motrices dépend donc surtout aujourd'hui des perfectionnements qu'attend la pile.

CHAPITRE VI

PHÉNOMÈNES D'INDUCTION.

686. **Induction par les courants.** — On a déjà vu (580) qu'on désigne, en général, sous le nom d'*induction* l'action qu'exercent à distance les corps électrisés sur les corps à l'état neutre ; mais c'est surtout quand il s'agit des effets produits par l'électricité dynamique que cette dénomination est usitée. M. Faraday, qui le premier, en 1832, a fait connaître cette classe de phénomènes, a nommé *courants d'induction* ou *courants induits*, des courants instantanés qui se développent dans les conducteurs métalliques sous l'influence des courants électriques, et aussi sous l'influence d'aimants puissants, ou même sous celle de l'action magnétique de la terre.

On constate l'induction produite par les courants au moyen d'une *bobine* à deux fils. On nomme ainsi un cylindre de carton

ou de bois, sur lequel s'enroulent en hélice, d'abord un gros fil de cuivre, puis un plus fin, tous les deux recouverts de soie (fig. 508). Les deux bouts *a* et *b* du fil fin étant mis en communication avec les extrémités du fil d'un galvanomètre, on fait passer un courant voltaïque dans le gros fil *cd* qu'on nomme le fil *inducteur*. Or, on observe alors les phénomènes suivants :

1° Au moment où le fil *cd* commence à être traversé par un courant, de *c* vers *d* par exemple, la déviation de l'aiguille du galvanomètre indique dans le fil *ab* un courant *inverse* du premier, c'est-à-dire de sens contraire, et qui ne se produit que pendant un temps très-court, car l'aiguille revient aussitôt au zéro et y reste tant que le courant inducteur passe dans le fil *cd*.

Fig. 508.

2° Au moment où, les communications étant rompues, le fil *cd* cesse d'être traversé par un courant, il se produit de nouveau, dans le fil *ab*, un courant induit, instantané comme le premier, mais *direct*, c'est-à-dire de même sens que le courant inducteur.

Ces phénomènes peuvent être assimilés à ceux qui ont été étudiés dans l'électricité statique sous le nom d'électrisation par influence (580); on peut, en effet, les considérer comme le résultat de la décomposition et de la recomposition, de molécule à molécule, de l'électricité naturelle du fil induit par l'influence de l'électricité qui se propage dans le fil inducteur. Cette théorie de la production des courants induits est celle qu'adopte M. de La Rive dans son traité d'électricité.

687. **Appareil d'induction de M. Matteucci.** — La figure 509 représente un appareil de M. Matteucci, construit par M. Ruhmkorff, à Paris, lequel est très-propre à montrer le développement des courants d'induction produits, soit par la décharge d'une bouteille de Leyde, soit par le passage d'un courant voltaïque.

Cet appareil se compose de deux plateaux de verre, de trente-trois centimètres de diamètre environ, fixés verticalement dans deux cadres A et B, de laiton. Ces plateaux sont portés sur des pieds mobiles, et peuvent s'approcher ou s'écarter à volonté. Sur la face antérieure du plateau A est enroulé, en spirale, un fil de cuivre C, d'un millimètre de diamètre et de 25 à 30 mètres de

longueur. Les deux bouts de ce fil passent au travers du plateau, l'un au centre, l'autre à la partie supérieure, et se terminent à deux petites pinces semblables à celles représentées en *m* et en *n* sur le plateau B. Dans ces pinces s'engagent deux fils de cuivre recouverts de soie *c* et *d*, qui sont destinés à recevoir le courant inducteur.

Sur la face du plateau B, qui est en regard du plateau A, s'enroule, aussi en spirale, un fil de cuivre, mais plus fin que le fil C. Ses extrémités aboutissent aux pinces *m* et *n*, qui reçoivent deux fils *h* et *i*, destinés à transmettre le courant induit. Les deux fils enroulés sur les plateaux A et B sont non-seulement recouverts de soie, mais chaque circuit est isolé du suivant par une couche épaisse de vernis à la gomme laque, condition indispensable pour expérimenter avec l'électricité des machines électriques, laquelle est toujours beaucoup plus difficile à isoler que celle des piles.

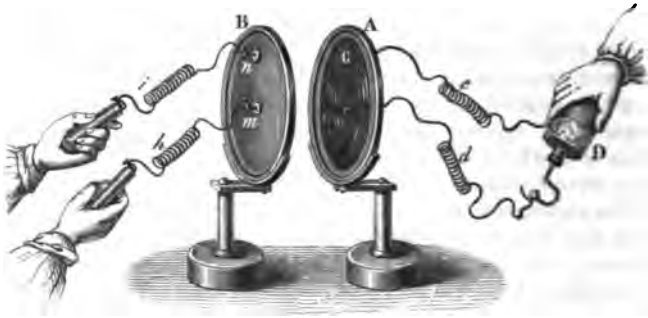


Fig. 509 (h = 44).

Cela posé, pour démontrer la production du courant induit par la décharge d'une bouteille de Leyde, on fait communiquer, comme le montre le dessin, l'un des bouts du fil C avec l'armature extérieure de la bouteille, et l'autre avec le crochet; à l'instant où l'étincelle part, l'électricité qui passe dans le fil C agissant par influence sur le fluide neutre du fil enroulé sur le plateau B, un courant instantané prend naissance dans ce fil. En effet, une personne qui tient dans les mains deux cylindres de cuivre en communication avec les fils *i* et *h*, reçoit une commotion dont l'intensité est d'autant plus forte que les plateaux A et B sont plus rapprochés. Cette expérience montre que l'électricité des machines électriques peut, aussi bien que celle de la pile, donner naissance à des courants d'induction.

L'appareil de M. Matteucci sert aussi à démontrer la production des courants induits par l'influence des courants voltaïques. Pour cela, on fait passer le courant d'une pile dans le fil inducteur C, et, en même temps, on fait communiquer les deux fils *h* et *i* avec un galvanomètre. Or, on observe, au moment où le courant inducteur commence ou finit, les mêmes phénomènes qu'avec la bobine décrite ci-dessus (fig. 508), et l'aiguille du multiplicateur est d'autant plus déviée que les deux plateaux A et B sont plus rapprochés.

688. **Induction par les aimants.** — On a vu que l'influence d'un courant aimante un barreau d'acier (673); réciproquement,

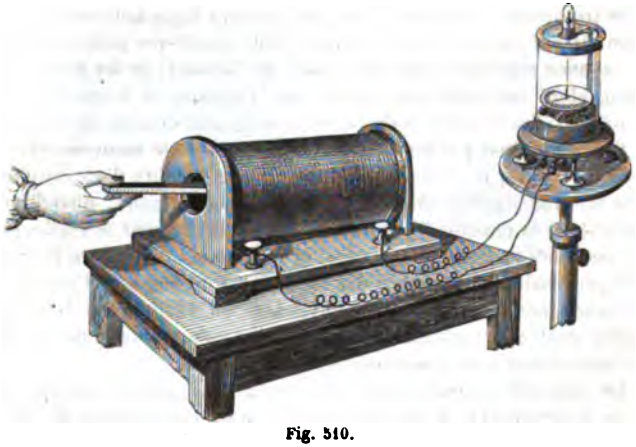


Fig. 510.

un aimant peut faire naître, dans les circuits métalliques, des courants d'induction. M. Faraday l'a démontré au moyen d'une bobine à un seul fil de 200 à 300 mètres de longueur. Les deux extrémités du fil étant mises en communication avec un galvanomètre, comme le montre la figure 510, on introduit brusquement dans la bobine, qui est creuse, un fort barreau aimanté, et on observe alors les phénomènes suivants :

1° Au moment où on introduit le barreau, le galvanomètre indique, dans le fil, un courant induit instantané, inverse de celui qui existe autour du barreau, en assimilant celui-ci à un solénoïde, comme on l'a fait dans la théorie d'Ampère (672).

2° Aussitôt qu'on retire le barreau, l'aiguille du galvanomètre, qui était revenue au zéro, indique un courant induit direct.

On peut encore constater l'influence inductrice des aimants par l'expérience suivante : on place, dans la bobine à un seul fil, un barreau de fer doux, et on approche brusquement un fort aimant ; l'aiguille du galvanomètre est déviée, revient au zéro aussitôt que l'aimant est fixe, et se dévie en sens contraire quand on l'éloigne. L'induction est ici produite par l'aimantation du fer doux, dans l'intérieur de la bobine, sous l'influence du barreau aimanté.

On obtient les mêmes effets d'induction, dans le fil d'un électro-aimant, si, en avant des extrémités de celui-ci, on fait tourner rapidement un fort barreau aimanté, de manière que ses pôles agissent successivement par influence sur les deux branches de l'électro-aimant ; ou bien encore, en formant deux bobines autour d'un aimant en fer à cheval, et en faisant passer une plaque de fer doux avec rapidité devant les pôles de l'aimant; le fer doux, en s'aimantant par influence, réagit sur l'aimant, et il en résulte. dans le fil, des courants induits, successivement de sens contraires.

689. **Induction par les aimants dans les corps en mouvement.**— Arago observa, le premier, en 1824, que le nombre d'oscillations que fait une aiguille aimantée, dans des temps égaux, quand on l'écarte de sa position d'équilibre, est très-affaibli par le voisinage de certaines masses métalliques, et notamment du cuivre rouge. qui peut réduire le nombre des oscillations de 300 à 4. Cette observation conduisit le même physicien, en 1825, à un fait non moins inattendu : celui de l'action rotative qu'une plaque de cuivre en mouvement exerce sur une aiguille aimantée,

On constate ce phénomène au moyen de l'appareil représenté dans la figure 511. Il se compose d'un disque métallique M, mobile autour d'un axe vertical. Sur cet axe est une poulie B, autour de laquelle s'enroule un cordon sans fin qui va passer sur une poulie plus grande A. En faisant tourner celle-ci avec la main, on peut imprimer au disque M un mouvement de rotation très-rapide. Au-dessus du disque est un carreau de verre fixe, auquel est adapté un petit pivot qui porte une aiguille aimantée *ab*. Cela posé, si le disque prend un mouvement lent et uniforme, l'aiguille est déviée dans le sens du mouvement et s'arrête à 20 ou 30 degrés du méridien magnétique, selon la vitesse de rotation du disque. Mais si cette vitesse augmente, l'aiguille finit par être déviée de plus de 90 degrés : alors elle est entraînée, décrit une révolution entière, et suit le mouvement du disque jusqu'à ce qu'il s'arrête.

L'effet décroît avec la distance de l'aiguille au disque et varie beaucoup avec la nature de celui-ci. Le maximum d'effet a lieu avec

les métaux; avec le bois, le verre, l'eau, etc., il est nul. MM. Babbage et Herschell, en Angleterre, ont trouvé qu'en représentant par 100 l'action d'un aimant sur un disque de cuivre, cette action sur les autres métaux, est représentée par les nombres suivants : zinc, 95; étain, 46; plomb, 25; antimoine, 9; bismuth, 2. Enfin, l'effet est très-affaibli si le disque présente des solutions de continuité, surtout dans le sens de ses rayons; mais les mêmes physi-

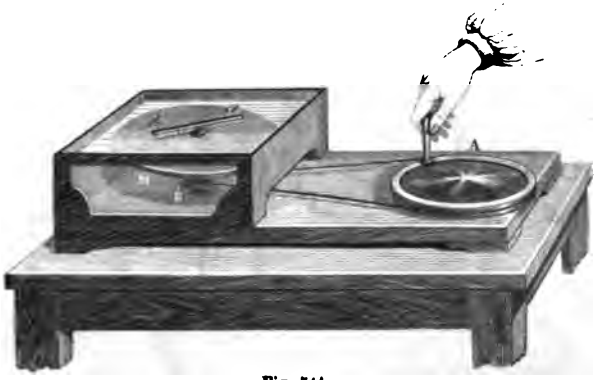


Fig. 511.

ciens ont constaté qu'il reprend sensiblement la même intensité si l'on soude les solutions de continuité avec un métal quelconque.

Arago a reconnu que la force qui imprime à l'aiguille son mouvement de rotation est la résultante de trois autres forces, l'une perpendiculaire au plan du disque, et agissant par répulsion sur l'aiguille; la seconde, dirigée dans le sens du rayon du disque, et agissant d'abord par répulsion sur l'aiguille à partir de la circonférence du disque, puis décroissante en s'approchant du centre, pour se changer en force attractive en approchant davantage de ce point, et devenir nulle en ce point même; enfin, la troisième force, parallèle au plan du disque, est perpendiculaire, en chaque point, au rayon, et son action est attractive; c'est donc cette dernière force qui fait tourner l'aiguille. Arago ne découvrit point l'origine de ces différentes forces, c'est M. Faraday qui, le premier en 1832, a fait voir, à l'aide du galvanomètre, qu'elles étaient dues à des courants d'induction développés dans les disques par l'influence de l'aiguille aimantée.

* 690. **Induction par l'action de la terre.** — M. Faraday a reconnu,

le premier, que le magnétisme terrestre peut développer des courants induits dans les corps métalliques en mouvement, en agissant comme un puissant aimant placé dans l'intérieur du globe dans la direction de l'aiguille d'inclinaison, ou, conformément à la théorie d'Ampère (672), comme un circuit de courants électriques dirigés de l'est à l'ouest parallèlement à l'équateur magnétique. Il le constata d'abord en plaçant une longue hélice de fil de cuivre recouvert de soie, dans le plan du méridien magnétique, parallèlement

Fig. 512.

à l'aiguille d'inclinaison : en faisant tourner cette hélice de 180 degrés autour d'un axe qui la traversait en son milieu, il observait qu'à chaque demi-révolution, un galvanomètre, en communication avec les deux bouts de l'hélice, était dévié. Pour démontrer les courants induits développés par l'action de la terre, on a construit l'appareil représenté dans la figure 512. Il se compose d'un anneau circulaire de bois MN, fixé à un arbre horizontal, avec lequel il peut tourner d'un mouvement plus ou moins rapide. Autour de cet anneau est pratiquée une gorge sur laquelle s'enroule un long fil de cuivre recouvert de soie. Les deux bouts de ce fil se rendent à un commutateur *a*, analogue à celui de l'appareil de Clarke (696), et au moyen duquel on peut obtenir un courant toujours de même sens. Enfin, les deux conducteurs en contact avec le commutateur sont mis en communication, par deux fils de cuivre, avec un galvanomètre. Cela posé, l'axe de l'anneau étant dirigé perpendiculairement au méridien magnétique, et, par conséquent, la rota-

tion de chaque point de l'anneau se faisant dans des plans parallèles à ce méridien, aussitôt qu'on fait tourner le système, on voit l'aiguille du galvanomètre dévier à l'est ou à l'ouest, suivant le sens de la rotation.

* 691. **Direction des courants induits sur les disques tournants.** — M. Faraday a cherché, le premier, quelle était la direction des courants induits sur la surface des disques métalliques tournant devant les pôles contraires de deux forts aimants. Son procédé consiste à mettre l'un des bouts du fil du galvanomètre en contact avec l'axe du disque tournant, et l'autre bout avec différents points de la circonférence du même disque. Il a ainsi constaté, d'après la déviation de l'aiguille du galvanomètre, que, pendant la rotation du disque, il se produit, à sa surface, des courants induits dirigés du centre à la circonférence, ou de la circonférence au centre, selon le sens de la rotation, et que ces courants sont symétriques par rapport au diamètre polaire, c'est-à-dire qui passe au-dessus des pôles des aimants.

MM. Nobili et Antinori se sont aussi occupés de rechercher la direction des courants induits sur les disques tournants, et pour cela, l'un des bouts du fil du galvanomètre étant en contact avec l'axe du disque, ils faisaient communiquer l'autre bout, non-seulement avec la circonférence du disque, mais encore avec les différents points de sa surface. Ils ont ainsi observé que sur les parties du disque entrant sous l'influence magnétique, il se développe constamment un système de courants contraires à ceux de l'aimant, et que sur les parties se dégageant de la même influence, il se produit des conrants de même sens que ceux de l'aimant, et par suite contraires aux premiers

M. Mattoucci ayant étudié les mêmes phénomènes, mais avec plus de précision, les a trouvés plus compliqués qu'on ne le pensait. La figure 513 représente l'appareil employé par ce physicien. Il se compose d'une caisse de bois dans laquelle une suite d'engrenages transmettent, à l'aide d'une manivelle M, un mouvement de rotation plus ou moins rapide à un disque de métal A, de 20 centimètres de diamètre. Au-dessous du disque, à un intervalle de 2 à 3 millimètres, est un puissant électro-aimant *ab*, qui se déplace dans une rainure, de manière à pouvoir présenter ses pôles successivement à tous les points du disque. Enfin, au-dessus du disque sont deux tiges de cuivre *m* et *n*, terminées chacune par une pointe émoussée et amalgamée, qui touche le disque. Ces mêmes tiges, à leur extrémité supérieure, communiquent avec les deux bouts du

fil d'un galvanomètre; de plus, par la disposition des supports auxquels elles sont fixées, elles peuvent occuper toutes les positions par rapport au centre et à la circonférence du disque.

Cela posé, au moyen de cet appareil, et en mettant l'un des bouts du fil du galvanomètre en contact avec le centre, et l'autre

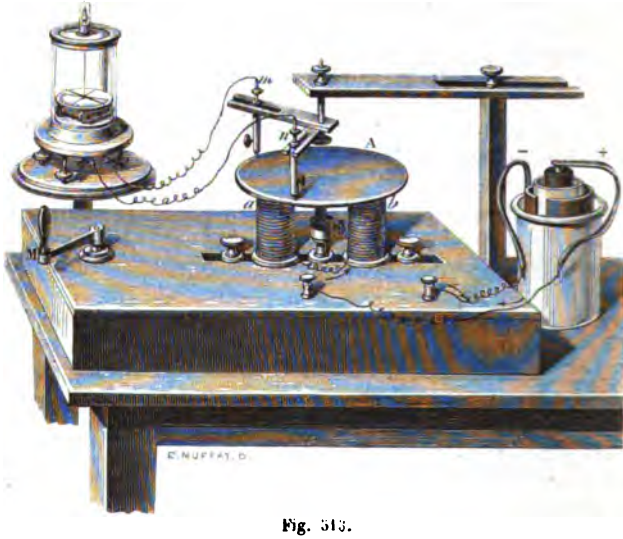


Fig. 513.

avec les différents points de la surface du disque, M. Matteucci a constaté les faits suivants, représentés sur la figure 514, dans laquelle les points N et S sont les projections des deux pôles de l'électro-aimant, et AB la droite qui passe sur ces deux pôles :

1° M. Matteucci a trouvé des *lignes de nul courant*, *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, qui sont normales à la ligne AB, et se contournent près des bords du disque, de manière à les couper toujours normalement.

2° La projection de chaque pôle de l'électro-aimant sur le disque est un *point neutre*, c'est-à-dire de nul courant; de plus, une ligne neutre *rr* sensiblement circulaire, qui passe par les projections des deux pôles et a pour centre l'axe de l'électro-aimant, est en même temps *ligne d'inversion*, c'est-à-dire que les courants en dedans et en dehors de cette ligne sont de directions contraires.

3° Les *lignes de courants électriques*, c'est-à-dire celles suivant lesquelles a lieu le maximum d'effet, coupent toujours normalement

les lignes de nul courant et sont tangentes à la droite AB; les lignes de courant maximum sont représentées en *m*, *n*, *p*, *q*, dans la figure ci-dessous.

4° La position de la ligne neutre *r* S *r* N qui passe par les projections des deux pôles n'est pas sensiblement modifiée par la nature du disque, par son épaisseur et par l'intensité du courant de la

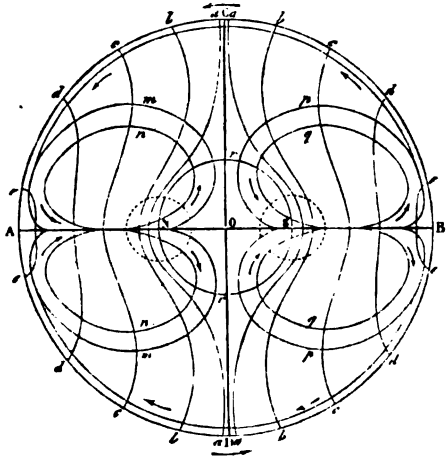


Fig. 514.

pile, mais cette ligne se resserre sur elle-même à mesure que la vitesse de rotation augmente.

5. Enfin, de chaque côté des points neutres, sur le diamètre polaire, on trouve deux points *maxima* dont la distance dépend de la grosseur de l'électro-aimant et du diamètre du disque tournant.

Pour plus de détail sur ces curieux phénomènes, nous renvoyons le lecteur au *Cours spécial sur l'induction et le magnétisme de rotation*, publié à la fin de 1854 par M. Matteucci.

* 692. **Induction d'un courant sur lui-même, extra-courant.** — Lorsque le fil dans lequel passe un courant voltaïque est contourné sur lui-même en hélice, on observe que les spires de l'hélice réagissent les unes sur les autres pour donner au courant plus d'intensité. En effet, avec une pile de quelques couples Bunsen, par exemple, on n'obtient qu'une étincelle à peine sensible, soit en fermant, soit en ouvrant le courant, si le fil qui réunit les deux pôles est court et non enroulé. De plus, si l'on fait partie du circuit en tenant

dans chaque main une électrode, on ne ressent aucune commotion. Au contraire, si le fil est long et enroulé un grand nombre de fois sur lui-même, de manière à former une bobine à plis serrés, l'étincelle devient nulle quand on ferme le courant, mais acquiert une assez grande intensité quand on l'ouvre, et, si l'on est placé dans le courant, on ressent, dans ce dernier cas, une commotion d'autant plus forte que le contact avec les mains est mieux établi et que la bobine est plus grosse.

M. Faraday a fait voir, à l'aide du galvanomètre, que ces phénomènes sont dus à un courant instantané, qu'on désigne sous le nom d'*extra-courant*, lequel se produit dans le fil même qui réunit les deux pôles, au moment où on interrompt la communication, et dans la même direction que le courant principal. Pour recueillir l'extra-courant, on soude à chacun des bouts du fil d'une bobine simple, c'est-à-dire à un seul fil, un appendice métallique, une plaque de cuivre, par exemple, et on tient une plaque dans chaque main, ou on les fait communiquer entre elles par le conducteur qu'on veut soumettre à l'extra-courant, celui-ci se produisant à chaque interruption du courant qui passe dans le fil de la bobine. On trouve ainsi que l'extra-courant donne de violentes commotions, de vives étincelles, décompose l'eau, fond le platine et fait dévier l'aiguille aimantée. M. Abria, qui a fait de nombreuses recherches sur les courants d'induction, a trouvé que l'intensité de l'extra-courant égale 0,72 environ de celle du courant principal. L'extra-courant doit être regardé comme un courant d'induction développé dans le fil inducteur même par l'action mutuelle des spires de la bobine les unes sur les autres.

Les effets ci-dessus acquièrent une intensité encore plus énernique si l'on introduit dans la bobine un barreau de fer doux, ou, ce qui revient au même, si l'on fait passer le courant dans les bobines d'un électro-aimant. C'est encore là un phénomène d'induction dû à la réaction du fer doux toutes les fois que son aimantation cesse.

* 693. **Courants induits de différents ordres.** — Malgré leur instantanéité, les courants induits peuvent eux-mêmes, par leur influence sur des circuits fermés, donner naissance à de nouveaux courants induits, puis ceux-ci à d'autres, et ainsi de suite, de manière à produire des *courants induits de différents ordres*.

Ces courants, découverts par M. Henri, à New-Jersey, se constatent en faisant réagir les unes sur les autres une suite de bobines formées chacune d'un fil de cuivre recouvert de soie et contourné

sur lui-même en spirale dans un même plan, comme celle représentée sur le plateau A, dans la figure 509. On remarque que les courants qui se produisent alors dans les bobines sont alternativement de sens contraires, et que leur intensité décroît à mesure qu'ils sont d'un ordre plus élevé.

APPAREILS FONDÉS SUR LES COURANTS D'INDUCTION.

694. **Appareil de Clarke.** — M. Clarke, à Londres, a construit un appareil à l'aide duquel on produit tous les effets des courants d'induction magnétique. Cet appareil se compose d'un faisceau aimanté A (fig. 515), très-puissant, recourbé en fer à cheval, et appliqué verticalement le long d'une planchette de bois. En avant de ce faisceau est un électro-aimant BB', mobile autour d'un axe horizontal. Ses bobines sont formées sur deux cylindres de fer doux, reliés à un bout par une plaque V, de fer doux, et à l'autre par une plaque semblable, de laiton. Ces deux plaques sont fixées à un axe de cuivre terminé, à une extrémité, par un commutateur *qi*, et, à l'autre, par une poulie à laquelle on transmet le mouvement au moyen d'une courroie sans fin et d'une grande roue R mue par une manivelle.

Chaque bobine est formée d'un fil de cuivre très-fin, recouvert de soie et faisant jusqu'à 1500 tours. Un bout du fil de la bobine B se réunit, sur l'axe de rotation, à un bout du fil de la bobine B', et les deux autres bouts viennent aboutir à une virole de cuivre *q*, qui est fixée à l'axe, mais qui en est isolée par une enveloppe cylindrique d'ivoire. On a soin que dans les bouts qui se réunissent, le courant induit soit de même sens, ce qui s'obtient en enroulant les fils en sens contraires sur les deux bobines.

Cela posé, lorsque l'électro-aimant tourne, ses deux branches s'aimantent alternativement en sens contraires sous l'influence de l'aimant A, et, dans chaque fil, il se produit un courant induit qui change de direction à chaque demi-révolution. Pour suivre ces courants dans leur marche, il faut se rappeler que les deux bouts de fil qui aboutissent à la virole *q* donnent un courant de même sens, et qu'il en est de même de ceux qui se réunissent à l'axe. Or, en avant de la virole *q* est une deuxième virole de cuivre *o*, formée de deux pièces égales, isolées l'une de l'autre, mais en communication, l'une avec *q*, l'autre avec l'axe. Il résulte de là que, pendant la rotation de l'électro-aimant, chaque moitié de la virole *o* représente

un pôle qui change de signe à chaque demi-révolution. Des deux pièces *o*, le courant passe sur deux lames de laiton *b* et *c*, fixées sur deux plaques de cuivre *m* et *n*. Par cette disposition, le courant, dans chaque lame *b* et *c*, est constamment de même sens. En effet, la lame *c*, par exemple, touche successivement les deux pièces *o*; elle est donc successivement en communication avec l'axe et avec *q*,

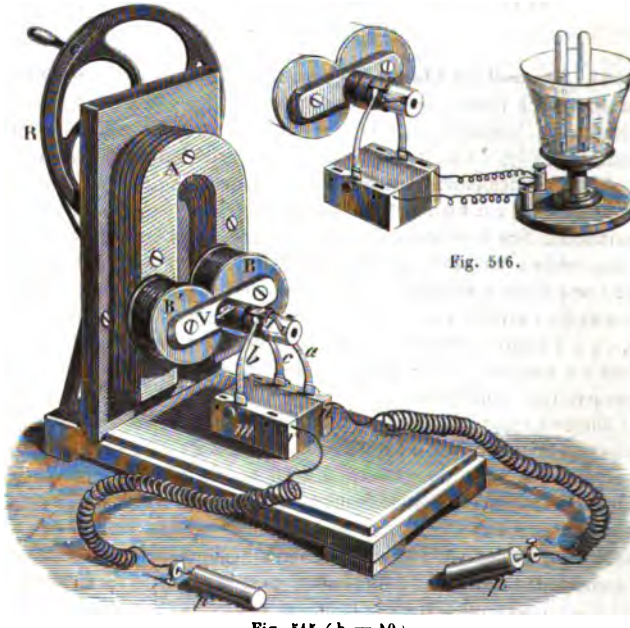


Fig. 516.

Fig. 515 (h = 50).

et par suite avec deux bouts des fils, puis avec les deux autres. Mais les fils étant enroulés en sens contraire, quand la bobine B' prend la place de B, le courant de la virole *q*, ainsi que celui de l'axe, change de signe; par conséquent, il en est de même de chaque moitié de la virole *o*, et comme actuellement la lame *c* touche une autre moitié que celle qu'elle touchait d'abord, il faut qu'elle continue à être traversée par un courant de même sens.

Avec les deux lames *b* et *c* seules, les deux courants contraires qui partent des deux pièces *o* ne pourraient se réunir; mais on y parvient au moyen d'une troisième lame *a* et de deux appen-

dices *i*, dont un seul est visible sur la figure. Ces deux appendices sont isolés l'un de l'autre sur un cylindre d'ivoire, mais communiquent respectivement avec les pièces *o*. Toutes les fois que la lame *a* touche un de ces appendices, elle est en communication avec la lame *b*, et le courant est fermé, car il passe de *b* en *a*, puis gagne la lame *c* par la plaque *n*. Au contraire, tant que la lame *a* ne touche pas un des appendices, le courant est interrompu.

Au moment où le courant s'interrompt, on peut obtenir de très-fortes commotions; pour cela, on fixe, en *n* et en *r*, deux longs fils de cuivre contournés en hélice, et terminés par deux cylindres *p*

Fig. 517.

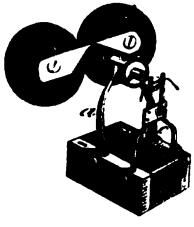


Fig. 518.

et *p'*, qu'on prend dans les mains. Alors, chaque fois que le courant s'interrompt, il se produit, dans le circuit formé par les fils *np*, *rp'* et par le corps, un extra-courant instantané (692) qui fait éprouver une violente commotion. Celle-ci se renouvelle à chaque demi-révolution de l'électro-aimant, et son intensité augmente avec la vitesse de rotation. De plus, les muscles se contractent avec une telle force qu'ils refusent d'obéir à la volonté, et qu'on ne peut plus lâcher les deux poignées. Avec un appareil bien construit et de grande dimension, on ne peut résister à la durée de la commotion; celui qui veut persister est renversé, se roule sur le sol et cède bientôt à la souffrace.

Avec l'appareil de Clarke, on fait produire aux courants d'induction tous les effets des courants voltaïques. La figure 516 montre comment on dispose l'expérience pour la décomposition de l'eau. La lame *a* est alors supprimée, le courant se trouvant fermé par le liquide dans lequel se rendent les deux fils qui représentent les électrodes.

Pour les effets physiologiques et chimiques, le fil enroulé sur les bobines est fin et d'une longueur de 500 à 600 mètres sur cha-

cune. Pour les effets physiques, au contraire, le fil est gros et d'une longueur de 25 à 30 mètres sur chaque bobine. Les figures 517 et 518 montrent la forme qu'on donne alors aux bobines et au commutateur. La première représente l'inflammation de l'éther, et la seconde l'incandescence d'un fil métallique *o*, dans lequel passe, toujours dans le même sens, le courant allant de la lame *a* à la lame *c*.

Avant Clarke, Pixii fils, à Paris, avait construit un appareil du même genre, qui n'en différait que parce que l'électro-aimant étant fixe, c'était le faisceau aimanté qui tournait.

* 695. **Bobine de Ruhmkorff.** — M. Ruhmkorff a construit pour la première fois, en 1851, des bobines à deux fils, de très-grandes

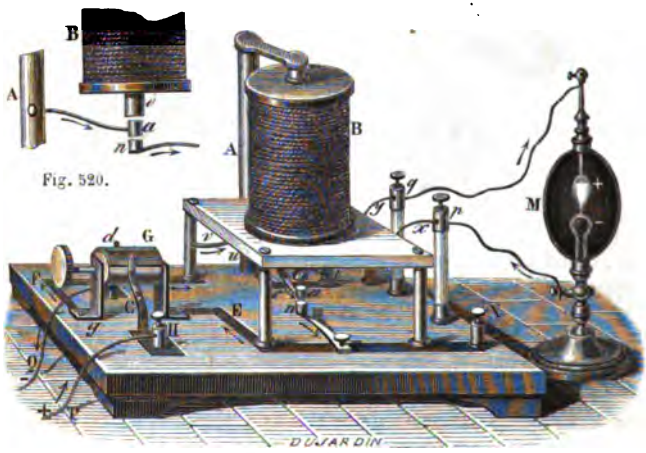


Fig. 519 (h = 42).

dimensions, à l'aide desquelles on parvient à faire produire aux courants d'induction, même avec un seul couple de Bunsen, des effets physiques, chimiques et physiologiques équivalents et même supérieurs à ceux que donnent les plus puissantes machines électriques.

L'appareil de M. Ruhmkorff se compose d'une forte bobine B (fig. 519) posée verticalement sur un plateau de verre épais qui l'isole. Cette bobine, qui a environ 30 centimètres de hauteur, est formée de deux fils : un gros, de deux millimètres de diamètre, faisant trois cents tours, et un fin, d'un tiers de millimètre de dia-

mètre seulement, enroulé sur le premier, faisant dix mille tours environ, et d'une longueur de 4 à 5 kilomètres. Ces fils sont non-seulement recouverts de soie, mais chaque spire est isolée de la suivante par une couche de vernis à la gomme laque. C'est le gros fil qui est le fil inducteur. Le courant qui le parcourt est simplement celui d'un ou deux couples de Bunsen. Le pôle positif de la pile étant en communication avec le fil PH, le courant se rend, par le conducteur C, sur un commutateur G ; de là, il descend par une pièce métallique *g*, gagne une plaque de cuivre F, qui le conduit à une des extrémités *v* du gros fil de la bobine. L'autre bout de ce fil allant aboutir en *i*, à l'un des pieds de cuivre qui soutient le plateau de verre, le courant, au sortir de la bobine, se porte sur une seconde plaque *c*, d'où il monte dans une colonne de fer *u*A. Là, le courant atteint un marteau oscillant *a* (fig. 520), qui tantôt est en contact avec un conducteur *n*, tantôt en est éloigné. Lorsque le contact a lieu, le courant suit les conducteurs *n* et E (fig. 519), comme l'indiquent les flèches, monte dans le commutateur G, d'où il retourne à la pile par le conducteur *d* et par le fil Q.

Quant au mouvement de va-et-vient du marteau *a*, il est produit par un cylindre de fer doux *ro*, placé dans l'axe de la bobine. Lorsque le courant de la pile passe dans le gros fil de celle-ci, ce fer s'aimante (673) et attire de bas en haut le marteau *a*, qui est aussi en fer. Le courant se trouvant alors interrompu, puisqu'il ne peut passer dans la pièce *n*, le cylindre *or* perd son aimantation, et le marteau *a* retombe. A ce moment, le courant recommence, la pièce *a* est soulevée de nouveau, et ainsi de suite. A mesure que le courant de la pile passe ainsi, par intermittences, dans le gros fil de la bobine, à chaque interruption, un courant d'induction successivement direct et inverse se produit dans le fil fin. Or, celui-ci étant complétement isolé, le courant induit acquiert une tension tellement considérable qu'il peut produire des effets très-intenses. M. Fizeau a encore augmenté cette intensité en interposant un condensateur dans le circuit inducteur. Ce condensateur, tel qu'il est construit par M. Ruhmkorff, se compose de deux feuilles d'étain collées sur les deux faces d'une bande de taffetas gommé, de 4 mètres de longueur environ, et repliées entre deux autres bandes de ce même taffetas, de manière à pouvoir être introduites dans l'intérieur de la planchette servant de support à l'appareil. Les armures du condensateur sont en communication avec deux boutons X, qui sont fixés sur la planchette, et servent à recueillir l'extra-courant (692) à chaque interruption du courant inducteur.

Outre le modèle que nous venons de décrire, M. Ruhmkorff construit aujourd'hui des bobines de plus grandes dimensions, qui ont jusqu'à 22 centimètres de diamètre et 45 centimètres de longueur. Le gros fil, qui a deux millimètres et demi de diamètre, s'enroule deux fois sur toute la longueur de la bobine; puis ensuite le fin, dont le diamètre n'est que d'un cinquième de millimètre. Sa longueur va jusqu'à 15 000 mètres, c'est-à-dire près de quatre lieues; et il est isolé avec soin au moyen de rubans de soie et de gomme laque, car c'est surtout d'un isolement parfait que dépend la puissance de la bobine.

Dans ces appareils, c'est toujours le fil fin, c'est-à-dire le fil induit, qui produit les différents effets que nous allons faire connaître.

* 696. **Effets produits avec la bobine de Ruhmkorff.** — M. Masson, le premier, a reconnu la tension considérable des courants d'induction et a cherché à l'utiliser pour en obtenir des effets d'électricité statique. Dans ce but, il construisit, en 1842, avec M. Bréguet, un appareil d'induction à l'aide duquel il obtint des effets lumineux et calorifiques déjà très-remarquables; mais c'est depuis que M. Ruhmkorff a isolé complétement le courant d'induction avec de la gomme laque, dans sa bobine, comme il a été dit ci-dessus, qu'on a pu utiliser toute la tension des courants d'induction, et reconnaître que ces courants possèdent, à la fois, les propriétés de l'électricité statique et de l'électricité dynamique. Un grand nombre de physiciens se sont empressés de multiplier les expériences avec la bobine de M. Ruhmkorff, particulièrement, à l'étranger, MM. Grove, Neef et Poggendorf, et en France, MM. Quet, Masson, Despretz, Ed. Becquerel, Gaugain et Du Moncel.

Les effets physiologiques de la bobine de Ruhmkorff sont extrêmement intenses; en effet, les commotions sont tellement violentes que déjà plusieurs observateurs ont été renversés sur le coup. Avec deux couples de Bunsen on tue un lapin, et avec un nombre de couples peu considérable un homme serait foudroyé.

Les effets calorifiques sont aussi faciles à constater; il suffit pour cela d'interposer, entre les deux extrémités p et q du fil induit, un fil de fer très-fin; celui-ci est fondu et brûle avec une vive lumière. On observe ici ce phénomène curieux que si l'on termine chacun des fils p et q par un fil de fer très-fin, lorsqu'on approche ces deux fils de fer l'un de l'autre, il n'y a que celui qui correspond au pôle négatif qui se fonde; ce qui montre que la tension est plus grande au pôle négatif qu'au pôle positif.

Les effets chimiques de la bobine de Ruhmkorff sont extrêmement variés, ce qui tient à ce que cet appareil donne à la fois de l'électricité statique et de l'électricité dynamique. Par exemple, d'après la forme des électrodes de platine qui plongent dans l'eau, d'après leur distance, d'après le degré d'acidulation de l'eau, on peut n'obtenir dans l'eau que des effets lumineux sans décomposition, ou bien la décomposition de l'eau avec la séparation des gaz aux deux pôles, ou la décomposition avec les gaz mélangés à un seul pôle, ou enfin avec les gaz mélangés aux deux pôles.

Les gaz peuvent aussi être décomposés ou se combiner par l'action prolongée de l'étincelle du courant d'induction. MM. Ed. Becquerel et Frémy ont, en effet, constaté que si l'on fait passer le courant de la bobine de Ruhmkorff dans un tube de verre plein d'air et hermétiquement fermé, comme le montre la figure 521, l'azote et l'oxygène de l'air se combinent en donnant naissance à de l'acide nitreux.

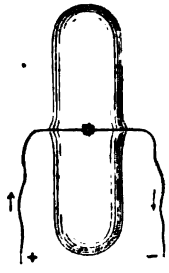


Fig. 521.

Les effets lumineux de la bobine de Ruhmkorff sont aussi très-variés, suivant qu'ils ont lieu dans l'air, dans le vide ou dans les vapeurs très-raréfiées. Dans l'air, ils donnent naissance à une étincelle vive et bruyante, dont l'étendue va jusqu'à 30 centimètres avec la grande bobine de 45 centimètres de longueur; dans le vide, les effets sont on ne peut plus remarquables. Pour faire l'expérience, on fait communiquer les deux fils q et p de la bobine avec les deux tiges de l'œuf électrique déjà décrit (608) pour observer dans le vide les effets lumineux de la machine électrique. Le vide étant fait dans le globe, à un ou deux millimètres au moins, on voit une belle traînée lumineuse se produire d'une boule à l'autre, d'une manière sensiblement continue et avec la même intensité que celle qu'on obtient avec une puissante machine électrique dont on tourne rapidement le plateau. C'est cette expérience qui est représentée en petit dans la figure 519, et plus en grand dans la figure 524. La figure 522 représente une déviation remarquable que subit la lumière électrique quand on approche la main de l'œuf.

C'est le pôle positif du courant induit qui présente le plus d'éclat; sa lumière est rouge de feu, tandis que celle du pôle négatif est faible est violacée; de plus, cette dernière se prolonge tout le long

de la tige négative, phénomène qui ne se produit pas au pôle positif.

Enfin, la bobine de Ruhmkorff produit des effets mécaniques si puissants, qu'avec le grand appareil, on perce des lames de verre de 2 centimètres d'épaisseur. Toutefois, ce résultat n'est pas obtenu par une décharge unique, mais par plusieurs décharges successives.

* 697. **Stratification de la lumière électrique.** — En étudiant la lumière électrique que donne la bobine d'induction de M. Ruhm-

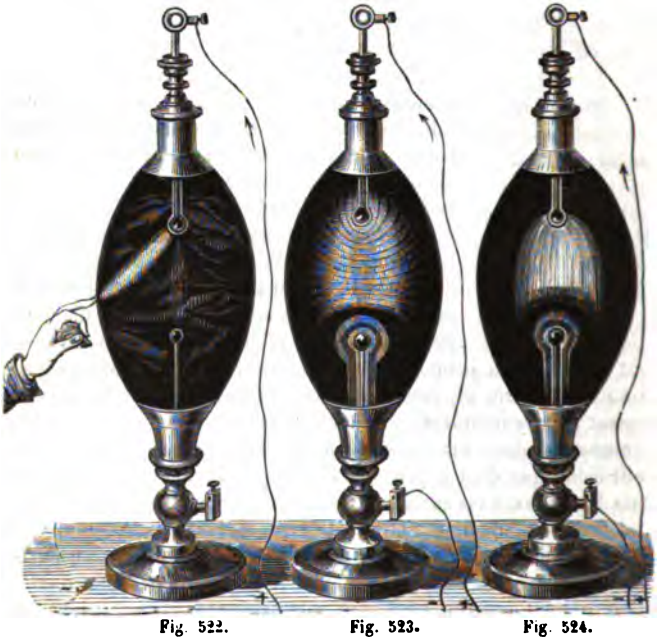


Fig. 522. Fig. 523. Fig. 524.

korff, M. Quet a observé que si l'on ne fait le vide dans le globe de l'expérience précédente qu'après y avoir introduit de la vapeur d'essence de térébenthine ou d'esprit de bois, d'alcool, de sulfure de carbone, etc., l'aspect de la lumière est complétement modifié. Elle apparaît alors sous la forme d'une série de zones alternativement brillantes ou obscures, formant comme une pile de lumière électrique entre les deux pôles (fig. 523).

Dans cette expérience, il résulte de la discontinuité du courant d'induction que la lumière n'est pas continue, mais consiste en une suite de décharges d'autant plus rapprochées que le marteau *a* (fig. 520) oscille plus rapidement. Les zones lumineuses paraissent alors animées d'un double mouvement giratoire et ondulatoire rapide. M. Quet regarde ce mouvement comme une illusion d'optique, se fondant sur ce que, si l'on fait osciller lentement le marteau avec la main, les zones apparaissent très-nettes et fixes.

La lumière du pôle positif est plus souvent rouge, et celle du pôle négatif violette. Toutefois, la teinte varie avec la vapeur ou le gaz qui se trouve dans le globe.

M. Despretz a observé que les phénomènes constatés par M. Ruhmkorff et par M. Quet avec un courant discontinu se reproduisent avec un courant continu ordinaire, mais avec cette différence importante que le courant continu exige un nombre de couples de Bunsen assez considérable, tandis que le courant discontinu de la bobine de M. Ruhmkorff n'en exige qu'un seul. C'est même un fait remarquable, constaté par l'expérience, que l'intensité des effets lumineux de cette bobine augmente fort peu quand on multiplie le nombre des couples de Bunsen.

La théorie des phénomènes de la stratification de la lumière électrique dans les vapeurs et de la coloration des pôles, n'est pas connue.

* 698. **Rotation des courants induits par les aimants.** — M. de La Rive a imaginé récemment une expérience qui démontre d'une manière curieuse l'action rotative des aimants sur les courants induits. Ce savant a d'abord fait cette expérience avec une forte machine électrique; mais elle présente un éclat bien plus remarquable avec la bobine de Ruhmkorff.

L'appareil de M. de La Rive se compose d'un ballon de verre, ou œuf électrique, muni à l'une de ses extrémités de deux robinets, l'un qui se visse sur la machine pneumatique, et l'autre, qui est un robinet semblable à celui de Gay-Lussac (304), sert à introduire quelques gouttes d'un liquide volatil dans le ballon. A l'autre extrémité de celui-ci est mastiquée une tubulure dans laquelle passe une tige de fer doux *mn*, de 2 centimètres de diamètre (fig. 525), et dont l'extrémité supérieure aboutit à peu près au centre du ballon. Cette tige est recouverte dans toute son étendue, sauf à ses deux extrémités, d'une couche isolante très-épaisse, formée d'abord de gomme laque, puis d'un tube de verre recouvert lui-même de gomme laque, encore d'un second tube de

verre, et enfin d'une couche de cire bien unie. Cette couche isolante doit avoir au moins un centimètre d'épaisseur. Dans l'intérieur du ballon, la couche isolante est entourée, en *x*, d'un anneau de cuivre qui communique par un fil de même métal avec un bouton extérieur *c*.

Cela posé, ayant fait le vide le plus parfait possible dans le ballon, on

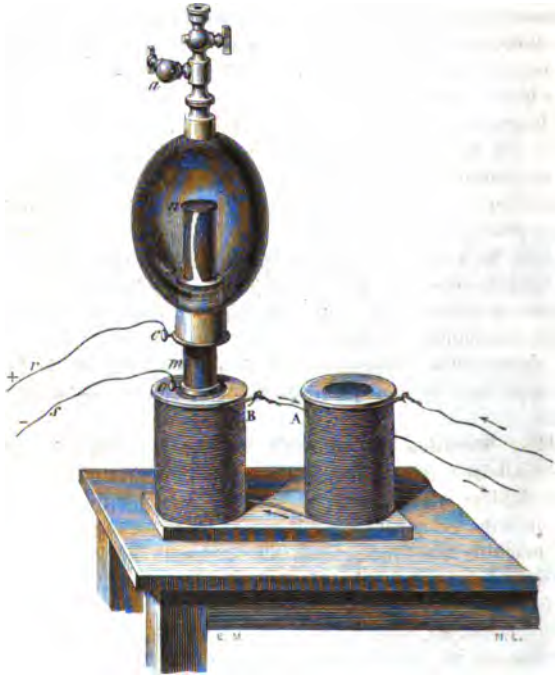


Fig. 525.

y introduit quelques gouttes d'éther ou d'essence de térébenthine, au moyen du robinet *a*, puis on fait le vide de nouveau, de manière qu'il ne reste dans le ballon qu'une vapeur extrêmement raréfiée. Posant alors, sur l'une des branches d'un fort électro-aimant AB, un disque épais de fer doux *o*, muni d'un bouton, on applique sur ce disque l'extrémité *m* de la tige *mn*, puis l'on fait arriver les deux bouts du fil induit de la bobine de Ruhmkorff, l'un au

bouton *c*, l'autre au bouton *o*. Or, si l'on fait alors marcher la bobine sans que l'électro-aimant fonctionne, les électricités contraires des fils *s* et *r* passant, celle du premier fil jusqu'à l'extrémité supérieure *n* de la tige de fer doux, et celle du second fil à l'anneau *x*, une gerbe lumineuse plus ou moins irrégulière apparaît à l'intérieur du ballon de *n* en *x*, tout autour de la tige, comme dans l'expérience de l'œuf électrique.

Mais si l'on fait passer un courant voltaïque dans l'électro-aimant, aussitôt le phénomène change : au lieu de partir des différents points du contour supérieur *n* et de l'anneau *x*, la lumière se condense et jaillit en un seul arc lumineux de *n* en *x*. De plus, et c'est là ce qu'il y a surtout de remarquable dans cette expérience, cet arc tourne assez lentement autour du cylindre aimanté *mn*, tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, selon la direction du courant induit ou le sens de l'aimantation. Dès que l'aimantation cesse, le phénomène lumineux redevient ce qu'il était auparavant.

Un fait digne de remarque dans cette belle expérience, c'est qu'elle a été imaginée *à priori* par M. de La Rive pour expliquer, par l'influence du magnétisme terrestre, une sorte de mouvement rotatoire de l'ouest à l'est, en passant par le sud, qu'on a observé dans les aurores boréales. En effet, la rotation de l'arc lumineux, dans l'expérience ci-dessus, doit évidemment se rapporter à la rotation des courants par les aimants (666); mais combien est rare la matière qui sert ici à transmettre le courant!

* 699. **Phosphorescence par la lumière électrique.** — Au nombre des expériences récentes faites avec la bobine de Ruhmkorff, nous citerons encore la suivante, due à M. Ed. Becquerel. Ce savant, qui s'est beaucoup occupé de la phosphorescence qu'excite la lumière solaire dans un grand nombre de substances, a trouvé que la lumière électrique possède la même propriété. Pour cela, il a pris des tubes de verre de 2 à 3 centimètres de diamètre et de 40 à 50 de longueur, aux extrémités desquels sont soudés des fils de platine qui permettent de faire traverser ces tubes par des décharges électriques provenant de batteries, ou mieux, de l'appareil d'induction de Ruhmkorff.

Après avoir introduit dans ces tubes les matières qu'on veut soumettre à l'action de la lumière électrique, on les vide d'air avant de les fermer, puis on fait communiquer les fils de platine avec les deux bouts du fil induit de la bobine de Ruhmkorff (fig. 526). La lumière électrique remplit alors le tube, et sa couleur est modifiée par celle que tend à prendre la substance qui est dans

le tube. Or, lorsqu'on interrompt le courant de la bobine, cette substance reste phosphorescente pendant un intervalle de temps qui, dans une obscurité profonde, peut se prolonger jusqu'à une ou deux minutes. La couleur de lumière phosphorescente varie non-seulement avec la substance qui est dans le tube, mais avec

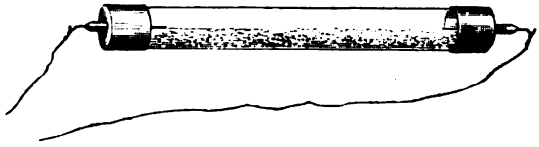


Fig. 526.

la température; en sorte qu'on peut obtenir, en modifiant l'une ou l'autre, toutes les teintes du spectre.

* 700. **Fusée de Statham.** — M. Statham, ingénieur anglais, a trouvé récemment qu'un fil de cuivre AB (fig. 527) étant recouvert de gutta-percha sulfurée, au bout de quelques mois il se forme, au contact du métal et de son enveloppe, une couche de sulfure de cuivre qui suffit pour conduire le courant. En effet, si, en une partie quelconque du circuit, on coupe la moitié supérieure de l'enveloppe, puis que, dans l'échancrure ainsi formée, on enlève un morceau du fil de cuivre, de six millimètres de longueur, un courant intense, qui passe dans le fil de cuivre, se trouve interrompu de *a* en *b*, mais il passe alors par le sulfure de cuivre qu'il

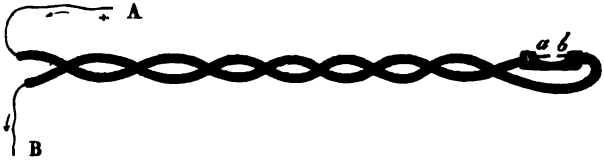


Fig. 527.

fait entrer en ignition. D'où il résulte que si, dans la cavité ainsi creusée, on met un corps inflammable, comme du coton-poudre, ou de la poudre à canon, ce corps prend feu : de là le nom de *fusée de Statham* donné à ce petit appareil. M. Du Moncel a appliqué avec un succès complet cette fusée et la bobine de Ruhmkorff à l'explosion de mines dans le port de Cherbourg.

Si l'on veut faire marcher la fusée de Statham avec une pile,

celle-ci doit être puissante; le courant entrant en A retourne à la pile par l'extrémité B, ou va se perdre dans le sol, ce qui revient au même. Mais, si, au lieu d'une pile, on fait usage de la bobine de M. Ruhmkorff, on obtient les mêmes effets avec deux couples de Bunsen. C'est alors le courant induit de cette bobine qui entre en A et sort en B. On constate donc ainsi les effets calorifiques des courants d'induction.

M. Faraday, qui a fait récemment de curieuses expériences sur les fils de cuivre revêtus de gutta-percha, a trouvé que les effets physiques et physiologiques produits par un courant qui passe dans ces fils, sont très-faibles et même insensibles, quand les fils sont dans l'air, et qu'au contraire les mêmes effets sont très-intenses lorsque les fils sont immergés dans l'eau ou plongés dans le sol. M. Faraday, qui expérimentait sur des fils de 160 kilomètres de longueur, explique ce phénomène en comparant le fil de cuivre recouvert de gutta-percha à une bouteille de Leyde construite sur une grande échelle : le fil de cuivre, chargé d'électricité par la pile ou par la bobine, agit par influence, au travers de la gutta-percha, sur l'eau ou sur le sol, qui se trouve ainsi former l'armature extérieure de la bouteille; de là l'accumulation de l'électricité et les effets puissants qu'on obtient alors.

Pour plus de détails sur la bobine de Ruhmkorff, nous renvoyons le lecteur à une brochure qu'a publiée M. Du Moncel sur cet appareil.

* 701. **Caractères des courants d'induction.** — D'après les différentes expériences indiquées jusqu'ici sur les courants d'induction, on voit que, malgré leur instantanéité, ils possèdent toutes les propriétés des courants voltaïques ordinaires. Comme eux, ils exercent des effets physiologiques violents, produisent des effets lumineux, calorifiques, chimiques, et donnent eux-mêmes naissance à de nouveaux courants induits. Enfin, ils font dévier l'aiguille des galvanomètres et aimantent les barreaux d'acier, quand on les fait passer dans un fil de cuivre entouré en hélice autour de ces barreaux.

L'intensité de la commotion des courants induits rend leurs effets comparables à ceux de l'électricité à l'état de tension (607). Toutefois, comme ils agissent toujours sur le galvanomètre, on doit admettre que, dans les fils soumis à l'induction, il y a, à la fois, de l'électricité à l'état de tension et à l'état dynamique. En effet, en recueillant d'une manière continue le courant induit de même sens, au moyen d'un commutateur, M. Masson est parvenu à charger

le condensateur. Mais cette hypothèse devient surtout probable par les effets obtenus ci-dessus avec la bobine de M. Ruhmkorff.

Le courant induit direct et le courant induit inverse ont été comparés entre eux sous trois points de vue : l'énergie de la commotion, l'amplitude de la déviation du galvanomètre, et l'action magnétisante sur les barreaux d'acier. Appréciés ainsi, ces courants présentent des résultats très-différents : ils paraissent sensiblement égaux quant à la déviation du galvanomètre, tandis que la commotion du courant direct étant très-forte, celle du courant inverse est à peu près nulle. La même différence a lieu pour la force magnétisante. Le courant direct aimante à saturation, mais le courant inverse n'aimante pas.

* 702. **Lois des courants d'induction.** — Dans son traité spécial sur l'induction, M. Matteucci déduit de ses propres travaux et de ceux de MM. Faraday, Lenz, Dove, Abria, Weber, Marianini et Félici, les lois suivantes sur les courants d'induction :

1° *L'intensité des courants induits est proportionnelle à celle des courants inducteurs.*

2° *Cette même intensité est proportionnelle au produit des longueurs des circuits inducteur et induit.*

3° *La force électro-motrice développée par une quantité donnée d'électricité, est la même, quelles que soient la nature, la section et la forme du circuit inducteur.*

4° *La force électro-motrice développée par l'induction d'un courant sur un circuit conducteur quelconque, est indépendante de la nature de ce conducteur.*

5° *Le développement de l'induction est indépendant de la nature du corps isolant interposé entre les circuits inducteur et induit.*

Cette dernière loi, comme nous l'avons déjà observé, n'est pas d'accord avec les expériences de M. Faraday sur l'induction de l'électricité à l'état statique (581).

* 703. **Chaleur développée par l'induction des aimants puissants sur les corps en mouvement.** — On a vu, en parlant de l'expérience d'Arago (689), qu'un disque de cuivre rouge tournant sur lui-même agit à distance sur un aimant mobile pour lui transmettre son mouvement de rotation. On verra bientôt (705) que réciproquement un cube de cuivre rouge, animé d'un mouvement de rotation rapide, est arrêté brusquement par l'influence des pôles de deux forts aimants (fig. 531). Il est évident que dans ces expériences, si l'on voulait empêcher la rotation de l'aiguille, ou que

le cube continuât à tourner, il faudrait dépenser constamment un certain travail mécanique pour vaincre la résistance qui résulte de l'action inductrice des aimants. Or, se basant sur la théorie de la transformation du travail mécanique en chaleur qui préoccupe les physiciens depuis quelques années (339), on a cherché quelle serait ainsi la quantité de chaleur développée par les courants d'induction sous l'influence d'aimants puissants. M. Joule, dans le but

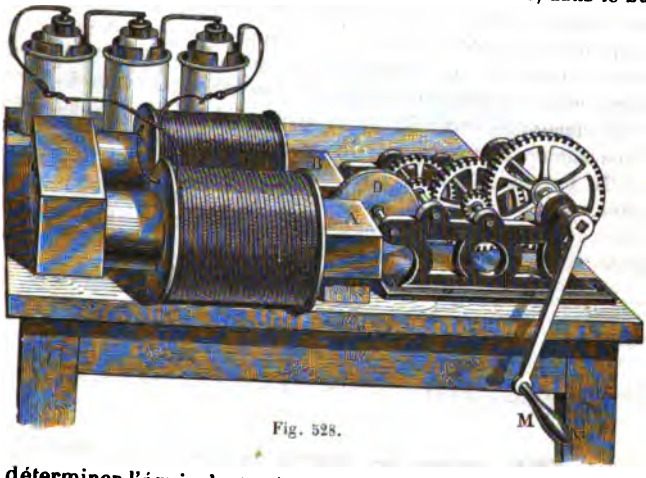


Fig. 528.

de déterminer l'équivalent mécanique de la chaleur, a enroulé une bobine autour d'un cylindre de fer doux, et ayant renfermé le tout dans un tube de verre plein d'eau, il a imprimé au système un mouvement de rotation rapide entre les branches d'un fort électro-aimant. Un thermomètre placé dans le liquide servait à mesurer la quantité de chaleur dégagée par les courants d'induction dans le fer doux et dans le fil de cuivre enroulé autour.

M. Foucault a fait récemment, à ce sujet, une expérience remarquable, à l'aide de l'appareil représenté dans la figure 528. Cet appareil consiste en un puissant électro-aimant fixé horizontalement sur une table. Deux pièces de fer doux A et B sont en contact avec les pôles de l'électro-aimant, de manière que, s'aimantant elles-mêmes par influence, elles concentrent sur les deux faces d'un disque métallique leur action magnétique inductrice. Un disque de cuivre rouge D, de 75 millimètres de diamètre et de 7 millimètres d'épaisseur, s'engage en partie entre les pièces A et B, où

il reçoit, à l'aide d'une manivelle et d'une suite de roues et de pignons, une vitesse de 150 à 200 tours par seconde.

Cela posé, tant que le courant de la pile ne passe pas dans le fil de l'électro-aimant, on n'éprouve qu'une très-faible résistance à tourner la manivelle, et si, une fois qu'elle a pris, avec les roues et le disque, un mouvement de rotation rapide, on l'abandonne à elle-même, la rotation continue assez longtemps en vertu de la vitesse acquise. Mais si on fait passer le courant, le disque et les autres pièces s'arrêtent presque instantanément, et si alors on reprend la manivelle, on ressent une résistance considérable. Or, si, malgré cette résistance, on continue à tourner, c'est ici que la force qu'on dépense se transforme en chaleur, le disque s'échauffant d'une manière remarquable. Dans une expérience faite devant nous par M. Foucault, la température du disque s'est élevée, en 3 minutes, de 10 degrés à 61, le courant étant fourni seulement par trois couples de la pile de Bunsen. Avec six, la résistance est telle qu'on ne pourrait tourner longtemps.

---

*CHAPITRE VII

EFFETS OPTIQUES DES AIMANTS PUISSANTS, DIAMAGNÉTISME.

704. **Effets optiques des aimants puissants.** — M. Faraday a découvert, en 1845, qu'un puissant électro-aimant exerce, sur plusieurs substances transparentes, une action telle que, si un rayon polarisé (546) les traverse dans la direction de la ligne des pôles magnétiques, le plan de polarisation est dévié soit à droite, soit à gauche (522), suivant le sens de l'aimantation.

La figure 529 représente l'appareil de M. Faraday, tel que le construit M. Ruhmkorff. Cet appareil est formé de deux électro-aimants M et N extrêmement puissants, fixés à deux chariots de fer O, O′, qui peuvent se rapprocher plus ou moins en glissant sur un support K. Le courant d'une pile de 10 à 11 couples Bunsen entre en A, gagne un commutateur H, la bobine M, puis la bobine N par le fil *g*, descend dans le fil *i*, passe de nouveau dans le commutateur et sort en B. Les deux cylindres de fer doux, qui occupent l'axe des bobines, sont percés de trous cylindriques pour laisser passer les rayons lumineux. Enfin, en *b* et en *a*, sont deux prismes de Nicol (520, 4°), le premier servant de polariseur, et le

second d'analyseur. A l'aide d'une alidade, ce dernier tourne au centre d'un cercle gradué P.

Cela posé, ces deux prismes étant placés de manière que leurs sections principales soient perpendiculaires entre elles, le prisme *a* éteint complétement la lumière transmise au travers du prisme *b*. Si alors on place en *c*, sur l'axe des deux bobines, une plaque à faces parallèles, de flint ou de verre, la lumière est encore éteinte tant

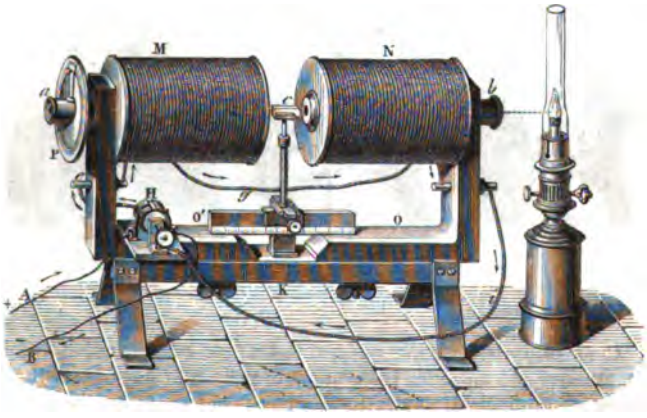


Fig. 529. (h = 43).

que le courant ne passe pas; or, aussitôt que les communications sont établies, la lumière reparaît, mais colorée, et si l'on tourne l'analyseur *a* à droite ou à gauche, selon la direction du courant, la lumière passe par les différentes teintes du spectre, ainsi qu'il arrive avec les plaques de quartz taillées perpendiculairement à l'axe (523). M. E. Becquerel a fait voir qu'un grand nombre de substances solides et liquides peuvent ainsi faire tourner le plan de polarisation, sous l'influence d'aimants puissants. M. Faraday admet que, dans ces expériences, la rotation du plan de polarisation est due à une action des aimants sur les rayons lumineux; M. Biot et M. Ed. Becquerel pensent que ce phénomène est dû à une action des aimants sur les corps transparents soumis à leur influence, hypothèse généralement admise.

705. **Effets diamagnétiques des aimants puissants.** — On a déjà vu (543) qu'on nomme *diamagnétiques* des corps qui sont repoussés par les aimants. Cette dénomination a été adoptée par M. Fara-

day, qui, le premier, observa ce genre de phénomène en 1847. Les effets diamagnétiques des aimants ne se manifestent qu'autant que ceux-ci sont très-puissants, et c'est avec l'appareil de M. Faraday (fig. 529) qu'ils ont été découverts et étudiés. On rencontre des corps diamagnétiques également dans les solides, dans les liquides et dans les gaz, ainsi que le démontrent les expériences suivantes, pour lesquelles on visse, sur les bobines, des armatures de fer doux S et Q, de formes diverses.

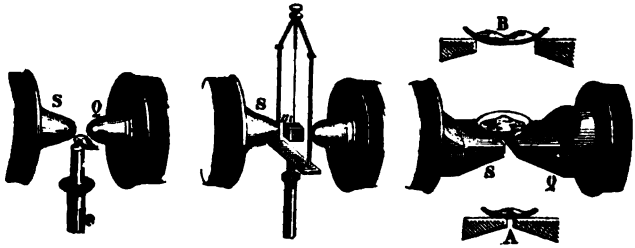


Fig. 530. Fig. 531. Fig. 532.

1° *Diamagnétisme des solides.* — Un petit cube de cuivre rouge étant suspendu entre les deux aimants par un fil de soie tordu, et tournant rapidement sur lui-même par l'effet du fil qui se détord (fig. 531), à l'instant où le courant passe dans les bobines, le cube s'arrête dans la position où il se trouve. Si l'on donne à la pièce mobile la forme d'une petite barre rectangulaire, elle se met en croix avec l'axe des bobines, ou se dirige suivant cet axe, selon qu'elle est formée d'une substance diamagnétique, comme le bismuth, l'antimoine, ou bien une substance magnétique, comme le fer, le nickel, le cobalt.

2° *Diamagnétisme des liquides.* — Les liquides présentent aussi les phénomènes de magnétisme et de diamagnétisme. Pour en faire l'observation, on en remplit de petits tubes de verre très-minces qu'on suspend à la place du cube *m* dans la figure 531. Si les liquides sont magnétiques, comme les dissolutions de fer, de nickel, de cobalt, les tubes se dirigent dans le sens de l'axe des deux électro-aimants; mais s'ils sont diamagnétiques, comme l'eau, l'alcool, l'éther, l'essence de térébenthine et la plupart des dissolutions salines, les tubes se placent dans une direction perpendiculaire à l'axe des aimants.

L'action des aimants puissants sur les liquides magnétiques ou

diamagnétiques s'observe encore au moyen de l'expérience suivante, faite pour la première fois par M. Plücher. On verse une dissolution de chlorure de fer dans un verre de montre, et on pose celui-ci sur les deux armatures P et Q des électro-aimants de l'appareil de Faraday. Aussitôt que le courant passe dans les électro-aimants, on voit la dissolution former, selon l'intervalle des bobines, un ou deux renflements, comme on l'a représenté en A et en B (fig. 532); ces renflements persistent tant que passe le courant, et se produisent, à des degrés différents, avec tous les liquides magnétiques. Les liquides diamagnétiques présentent des effets inverses, ainsi que l'a constaté M. Plücher pour le mercure, en observant sa courbure sur une pièce d'argent fraîchement amalgamée et posée sur les armatures.

3° *Diamagnétisme des gaz.* — M. Bancalary a observé, le premier, que la flamme d'une bougie, placée entre les deux bobines de l'appareil de Faraday, en est fortement repoussée (fig. 530). Toutes les flammes présentent, à des degrés différents, le même phénomène. M. Quet a obtenu des effets de répulsion extrêmement intenses en soumettant à la même expérience la lumière électrique de la pile obtenue avec les deux cônes de charbon de la figure 452, page 610.

Depuis l'expérience de M. Bancalary, M. Faraday et M. Ed. Becquerel ont fait de nombreuses recherches sur le diamagnétisme des gaz, ainsi que nous l'avons déjà dit en parlant de l'action des aimants puissants sur tous les corps (543). De plus, M. Faraday a reconnu que l'oxygène, qui est magnétique à la température ordinaire, devient diamagnétique à une température très-élevée, et que souvent le magnétisme ou le diamagnétisme d'une substance dépend du milieu dans lequel elle est. Par exemple, un corps magnétique dans le vide peut devenir diamagnétique dans l'air.

4° *Détonation produite par la rupture du courant sous l'influence d'un puissant électro-aimant.* — Nous citerons encore, comme effet remarquable de l'appareil de M. Faraday, l'expérience suivante due à M. Ruhmkorff. Lorsqu'on place entre les deux pôles S et Q de la figure 530, les deux extrémités du gros fil dans lequel passe le courant de l'électro-aimant, c'est-à-dire en fermant le courant entre les deux pôles P et Q, cette fermeture a lieu sans étincelle et sans bruit, ou seulement avec un bruit et une étincelle faibles. Mais, au moment où l'on sépare les deux extrémités du fil, et où, par conséquent, on interrompt le courant, on entend une détonation violente, presque aussi forte que celle d'un coup de

pistolet. Il semblerait donc ici que c'est l'extra-courant (692) dont l'intensité serait puissamment accrue par l'influence des deux pôles de l'électro-aimant.

706. **Théorie du diamagnétisme.** — Plusieurs théories ont été proposées pour donner l'explication des phénomènes diamagnétiques. On a déjà vu (543) que M. Ed. Becquerel admet que la répulsion exercée par les aimants sur certaines substances serait due à ce qu'elles sont entourées par un milieu plus magnétique qu'elles, ce qui est évidemment une application du principe d'Archimède. M. Plücher a donné une théorie qui diffère de celle de M. Ed. Becquerel, mais dans laquelle il s'appuie aussi sur le principe d'Archimède. M. Faraday a rattaché les phénomènes diamagnétiques aux phénomènes d'induction, en admettant que, dans un corps diamagnétique, comme le bismuth, par exemple, il se produit, à l'approche d'un fort aimant, des courants d'induction sur lesquels réagissent les courants d'Ampère, c'est-à-dire ceux que ce physicien a admis dans les aimants (672). De sorte que les pôles de même nom se plaçant alors en présence, il y a répulsion, de même que dans les solénoïdes (674). Dans les substances magnétiques, au contraire, il se produit des courants orientés de manière que les pôles non identiques sont en présence, et alors il y a attraction.

CHAPITRE VIII

COURANTS THERMO-ÉLECTRIQUES.

707. **Expériences de Seebeck.** — Il n'a été question jusqu'ici que de courants électriques développés par les actions chimiques; c'est là, en effet, la source d'électricité dynamique la plus puissante. Or, la chaleur peut aussi donner naissance à des courants, très-faibles, il est vrai, mais remarquables par la liaison qu'ils établissent entre la chaleur et l'électricité, et par l'application qu'ils ont reçue dans l'appareil de Melloni. On a donné à ces courants le nom de *courants thermo-électriques* pour les distinguer des courants dus aux actions chimiques qu'on désigne sous le nom de *courants hydro-électriques*.

On savait déjà que plusieurs cristaux naturels, comme la tourmaline, la topaze, acquéraient des propriétés électriques lorsqu'on

élevait leur température, et Volta avait annoncé qu'une lame d'argent, chauffée inégalement à ses deux extrémités, constituait un élément électro-moteur; mais c'est Seebeck, professeur à Berlin, qui, le premier, en 1821, montra que le mouvement du calorique, dans un circuit métallique, pouvait donner naissance à des courants électriques.

Ces courants se constatent au moyen du petit appareil représenté dans la figure 533, lequel consiste en une lame de cuivre

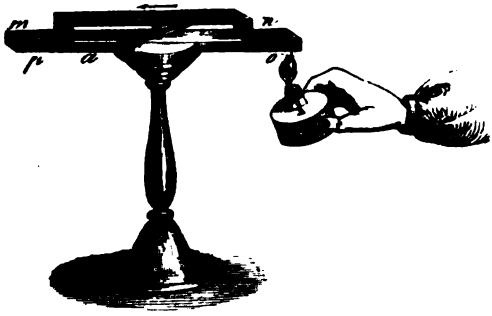


Fig. 533 (h = 17).

mn dont les extrémités sont recourbées et soudées à une lame de bismuth *op*. Dans l'intérieur du circuit ainsi formé est une aiguille aimantée *a*, mobile sur un pivot. Cela posé, ayant placé l'appareil dans la direction du méridien magnétique, on chauffe légèrement une des soudures, comme le montre le dessin, et on voit alors l'aiguille prendre une déviation qui indique la production d'un courant de *n* vers *m*, c'est-à-dire de la soudure chaude à la soudure froide, dans le cuivre. Si, au lieu de chauffer la soudure *n*, on la refroidit avec de la glace, en conservant à l'autre soudure sa température, il se produit encore un courant, mais en sens inverse, c'est-à-dire de *m* vers *n*, et, dans les deux cas, le courant a d'autant plus d'énergie que la *différence* de température des deux soudures est plus grande.

708. **Cause des courants thermo-électriques.** — Les courants thermo-électriques ne peuvent être attribués au contact, car ils peuvent se développer dans des circuits formés d'un seul métal. Ils ne proviennent pas non plus d'actions chimiques, puisque M. Becquerel a constaté qu'ils se produisent également dans le

vide et dans l'hydrogène. En observant ces courants à l'aide du galvanomètre, le même savant a trouvé qu'ils dépendent toujours de l'inégale propagation du calorique au travers des différentes parties du circuit.

Pour le démontrer, on prend un arc formé de deux métaux, et on réunit ses deux extrémités avec les deux bouts du fil galvanométrique, soit en les soudant ensemble, soit simplement par contact. Tant que tous les points du circuit ainsi formé sont à la même température, le galvanomètre n'indique aucun courant ; mais si on chauffe une des soudures, immédiatement la déviation de l'aiguille du multiplicateur accuse le passage d'un courant.

Si toutes les parties du circuit sont homogènes, il ne se manifeste aucun courant lorsqu'on chauffe un quelconque de ses points, parce qu'alors le calorique se propage également dans toutes les directions. C'est ce qui arrive, par exemple, si l'on réunit les deux bouts du fil de cuivre qui s'enroule autour du galvanomètre, avec un second fil de cuivre. Mais si l'on détruit l'homogénéité de ce dernier fil en un de ses points, en le tordant plusieurs fois sur lui-même, ou en le nouant, et qu'on le chauffe alors près de ce point, l'aiguille indique, par sa déviation, un courant allant du point chauffé au point où l'homogénéité a été détruite. En chauffant de l'autre côté de ce dernier point, le courant se produit en sens inverse.

709. **Pouvoir thermo-électrique des métaux.** — On nomme *pouvoir thermo-électrique* d'un métal, l'énergie du courant produit par la propagation de la chaleur dans ce métal. Pour une même différence de température entre deux points voisins, ce pouvoir varie d'un métal à un autre, et, pour un même métal, il augmente avec la différence de température.

En formant des circuits de différents métaux, dont une soudure était portée à 20 degrés, tandis que les autres étaient maintenues à zéro, M. Becquerel a pu ranger les métaux dans l'ordre croissant de leurs pouvoirs thermo-électriques, savoir : bismuth, platine, argent, étain, plomb, cuivre, or, zinc, fer et antimoine; chacun étant positif avec ceux qui le précèdent et négatif avec ceux qui le suivent.

710. **Théorie des courants thermo-électriques.** — Pour expliquer la production des courants par l'action de la chaleur, M. Becquerel admet que lorsqu'un circuit métallique est chauffé dans une de ses parties, le fluide naturel est décomposé, de manière qu'au moment où les molécules s'échauffent, elles s'emparent de l'élec-

tricité positive et repoussent l'électricité négative. Puis, les molécules suivantes s'échauffant à leur tour, s'électrisent positivement en cédant leur électricité négative aux premières, et ainsi de suite à mesure que le calorique se propage dans le circuit; en sorte qu'il se produit un courant d'électricité positive de la partie chaude vers la partie froide, et un courant d'électricité négative en sens contraire.

Cela posé, dans un circuit homogène, le calorique se propageant également dans tous les sens, la partie échauffée donne lieu à deux courants contraires et de même intensité, dont l'effet est nul sur l'aiguille du galvanomètre. Mais si le circuit cesse d'être homogène, la conductibilité calorifique n'étant plus la même, et le circuit s'échauffant plus dans un sens que dans l'autre, il se produit deux courants inverses d'inégale intensité; en sorte que l'énergie du courant observé est alors la différence de celles de ces deux courants. Le courant obtenu est donc d'autant plus intense que la différence des pouvoirs thermo-électriques des deux métaux est plus grande. Quant à la direction de ce courant, il découle de la théorie ci-dessus que le pôle positif correspond au métal qui a le plus grand pouvoir thermo-électrique, et le pôle négatif à l'autre.

711. **Propriétés des courants thermo-électriques.** — Les courants thermo-électriques se distinguent des courants hydro-électriques en ce que conduits, comme eux, par les métaux, ils ne le sont pas par les liquides, ou ne le sont qu'à un degré extrêmement faible. Toutefois, cette différence ne tient point à la nature de ces courants, mais seulement à leur tension qui est considérablement plus faible que celle des courants hydro-électriques. M. Pouillet a constaté, en effet, au moyen du galvanomètre différentiel, que l'intensité du courant thermo-électrique développé par un couple bismuth et antimoine dont les soudures sont maintenues à une différence de température de 100 degrés, est cent mille fois moindre que celle du courant hydro-électrique d'une pile à auges ordinaire de 12 couples.

N'étant pas conduits par les liquides, à cause de leur faible tension, les courants thermo-électriques ne produisent, en général, aucun effet chimique. Cependant, M. Botto, à Turin, en réunissant 150 couples thermo-électriques de platine et de fer, a pu obtenir des traces de décomposition dans les liquides.

Les courants thermo-électriques ont, de même que les courants hydro-électriques, une action directrice sur l'aiguille aimantée; mais comme, vu leur faible tension, ils s'affaiblissent rapidement

lorsque la longueur du circuit qu'ils traversent augmente, on doit éviter de leur faire parcourir de longs fils, quand on les fait passer dans le circuit du galvanomètre : c'est pourquoi, dans ce cas, on forme le circuit d'un fil court et gros, tandis que dans les galvanomètres destinés aux courants hydro-électriques, le fil est fin et long.

712. **Pile thermo-électrique de Nobili.** — On nomme *piles thermo-électriques* des appareils destinés à accumuler les tensions thermo-électriques qui se produisent dans un circuit composé de plusieurs métaux, quand on chauffe les soudures de deux en deux, les autres soudures étant maintenues à une température constante.

Fig. 534.

Fig. 535.

La première pile de ce genre, construite par Œrsted et Fourier, se composait d'une suite de petits barreaux de bismuth et d'antimoine, soudés à la suite les uns des autres en ligne droite ou en cercle. De deux en deux soudures, les barreaux de bismuth se terminaient par une partie coudée qui plongeait dans de la glace à zéro, tandis que les autres soudures étaient portées à une température de 200 à 300 degrés, à l'aide de petites lampes.

M. Nobili a modifié la forme de la pile thermo-électrique dans le but de lui donner un assez grand nombre de couples sous un petit volume. Pour cela, il a réuni les couples bismuth et antimoine de manière qu'après avoir formé une rangée de cinq couples, comme le montre la figure 535, le barreau de bismuth *b* se soude latéralement à l'antimoine d'une seconde rangée semblable, puis le dernier bismuth de celle-ci à l'antimoine d'une troisième rangée, et ainsi de suite pour quatre rangées verticales, contenant ensemble 20 couples, commençant par un antimoine et finissant par un bismuth. Ainsi disposés, ces couples sont isolés les uns des autres au moyen de petites bandes de papier enduites de vernis, puis renfermés dans un étui de cuivre P (fig. 534), de façon que les soudures seules apparaissent aux deux bouts de la pile. Deux tiges de cuivre *m* et *n*, isolées dans un anneau d'ivoire, communiquent intérieurement, l'une avec le premier antimoine, et représente le pôle positif, l'autre avec le dernier bismuth, et représente le pôle négatif. Ces tiges communiquent avec les extrémités du fil d'un

galvanomètre, lorsqu'on veut observer le courant thermo-électrique.

713. **Thermo-multiplicateur de Melloni.** — La pile thermo-électrique de M. Nobili, construite comme le représente la figure 534, et combinée avec le galvanomètre, est devenue, entre les mains de Melloni, l'appareil thermométrique le plus sensible que l'on connaisse. Ce savant, qui a donné à cet appareil le nom de *thermo-multiplicateur*, l'a disposé comme le montre la figure 536.

Sur une tablette de bois, supportée par quatre vis calantes, est

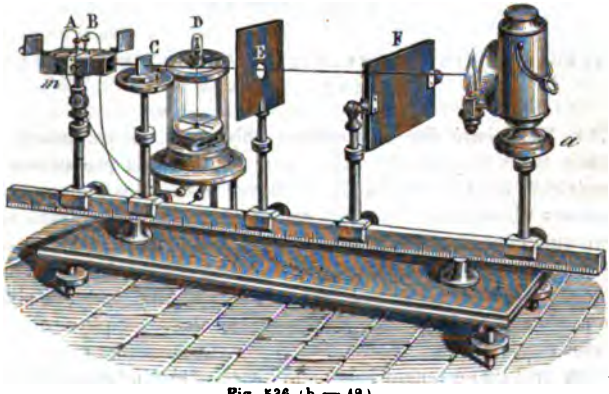


Fig. 536 (h = 42).

fixée, *de champ*, une règle de cuivre d'un mètre de longueur et divisée en centimètres. Sur cette règle se placent, à des distances variables, à l'aide de vis de pression, les différentes pièces dont se compose l'appareil, savoir : un support *a* sur lequel on met une lampe Locatelli, ou une autre source de chaleur, puis des écrans F et E, un second support C où l'on place les corps sur lesquels on expérimente, et enfin la pile thermo-électrique *m*. Près de l'appareil est un galvanomètre D, muni d'un fil court et gros, qui vient communiquer en A et B avec les deux pôles de la pile. La sensibilité de cet instrument est telle que la chaleur de la main suffit, à la distance d'un mètre, pour développer, dans la pile, un courant capable de faire dévier l'aiguille du galvanomètre. Quant à la graduation de ce dernier instrument, nous l'avons déjà fait connaître (651), ainsi que les importantes applications que Melloni a faites de son thermo-multiplicateur à l'étude du pouvoir diathermane des corps (356 à 366) et à la polarisation de la chaleur (534).

Pour employer le thermo-multiplicateur à la mesure des températures, on doit d'abord déterminer la relation qu'a la déviation de l'aiguille, et par suite l'intensité du courant, avec la différence des températures des soudures. Cela fait, la température des soudures non exposées à la source de chaleur une fois connue, la déviation donne celle des autres soudures, et, par conséquent, la température de la source.

CHAPITRE IX

ÉLECTRO-CHIMIE; THÉORIE CHIMIQUE DE LA PILE; COURANTS DÉRIVÉS.

714. **Electricité due aux actions chimiques.** — La théorie du contact, qu'avait proposée Volta pour expliquer la production de l'électricité dans la pile (616), ne tarda pas à être attaquée par plusieurs physiciens. Fabroni, compatriote de Volta, ayant observé que, dans la pile, les disques de zinc s'oxydaient au contact des rondelles acidulées, pensa que cette oxydation était la cause principale du dégagement de l'électricité. En Angleterre, Wollaston avança bientôt la même opinion, et Davy l'appuya d'ingénieuses expériences.

Il est vrai qu'en tenant à la main l'extrémité zinc d'un système de deux plaques zinc et cuivre, soudées bout à bout, tandis que l'extrémité cuivre touchait le plateau collecteur de l'électromètre condensateur (fig. 425, page 576), Volta avait obtenu des signes sensibles d'électricité; mais si l'on tient le zinc avec une pince de bois, M. de La Rive a fait voir que tout signe d'électricité disparaît, et qu'il en est encore de même si le zinc est placé dans des gaz, comme l'hydrogène, l'azote, qui n'exercent sur lui aucune action. M. de La Rive a conclu de là que le dégagement d'électricité, dans l'expérience de Volta, était dû aux actions chimiques qui résultent de la transpiration cutanée de la main, ou de l'oxygène de l'air.

On démontre le développement de l'électricité, dans les actions chimiques, au moyen de l'électromètre condensateur. Pour cela, on pose sur le plateau supérieur un disque de papier mouillé, et, dessus, une capsule de zinc dans laquelle on verse de l'eau et de l'acide sulfurique; puis on plonge dans le liquide une lame de platine communiquant avec le sol, tandis qu'on fait aussi communiquer avec lui le plateau inférieur par l'intermédiaire du doigt

mouillé. Lorsqu'on rompt les communications et qu'on enlève le plateau supérieur, on reconnaît que les feuilles d'or ont pris une quantité sensible d'électricité positive, ce qui montre que le plateau supérieur a été électrisé négativement par l'action chimique de l'acide sulfurique sur les parois de la capsule. Enfin, au moyen du galvanomètre, M. Becquerel a démontré que toute action chimique, quelque faible quelle soit, est toujours accompagnée d'un dégagement d'électricité.

Malgré les expériences qu'on vient de décrire, la théorie du contact n'est pas complétement abandonnée par les physiciens; plusieurs la soutiennent encore, particulièrement MM. Marianini, Ohm et Poggendorff. M. Becquerel, dans son Traité d'électro-chimie, admet que les effets du contact peuvent bien avoir lieu quand les affinités commencent à exercer leur action, et, par conséquent, avant que les combinaisons ne s'effectuent, mais que ces effets disparaissent vis-à-vis de ceux que produisent les actions chimiques. En général, l'opinion admise aujourd'hui est que si le contact développe de l'électricité, ce n'est qu'en quantité extrêmement faible, et que c'est à l'électricité résultant des actions chimiques que sont dus surtout les effets des piles.

L'état actuel de nos connaissances sur la théorie de l'électricité nous paraît bien résumé dans les principes suivants de M. Frankenheim, publiés récemment dans les Annales de Poggendorff.

« 1° Deux métaux hétérogènes, par leur contact, développent un courant dont l'intensité, du moins entre certaines limites, est une fonction de la température des métaux; 2° la véritable électricité de contact n'est pas l'électricité ordinaire de Volta, mais l'électricité de Seebeck; 3° le courant hydro-galvanique a sa source dans une action chimique; 4° l'électricité ordinaire de frottement est en partie thermo-électrique et en partie chimique, et dans nos machines électriques c'est certainement l'action chimique qui domine. »

715. **Lois du dégagement de l'électricité dans les actions chimiques.** — Toutes les actions chimiques sont accompagnées d'un dégagement d'électricité dans lequel on observe les lois suivantes, posées par M. Becquerel, et constatées au moyen du condensateur et du galvanomètre.

1° *Dans la combinaison de l'oxygène avec un autre corps, l'oxygène prend l'électricité positive, et le combustible l'électricité négative.*

2° *Dans la combinaison d'un acide avec une base, ou de*

corps se comportant comme tels, le premier prend l'électricité positive, et le second l'électricité négative.

3° *Quand un acide agit chimiquement sur un métal, l'acide s'électrise positivement et le métal négativement*, ce qui est une conséquence de la deuxième loi.

4° *Dans les décompositions, les effets électriques sont inverses des précédents.*

5° *Dans les doubles décompositions, l'équilibre des forces électriques n'est point troublé.*

Quant à la quantité d'électricité dégagée dans les actions chimiques, elle est énorme. En effet, M. Becquerel est arrivé à ce résultat, qui effraie l'imagination, que l'oxydation d'une quantité d'hydrogène pouvant donner 1 milligramme d'eau, dégage suffisamment d'électricité pour charger *vingt mille fois une surface métallique de 1 mètre de superficie*, à un degré tel que les étincelles résultant de la décharge éclatent à un centimètre de distance. MM. Faraday et Pelletier sont parvenus à des résultats semblables.

716. **Théorie chimique de la pile.** — En admettant exclusivement les actions chimiques comme cause du dégagement de l'élec-

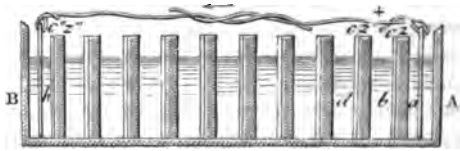


Fig. 537.

tricité dans la pile, M. de La Rive a donné de cet appareil la théorie suivante.

Si l'on considère une pile à auges AB (fig. 537), formée de couples zinc et cuivre, et dont les auges contiennent de l'acide sulfurique étendu d'eau (621), l'acide de chaque auge attaque le zinc, mais n'a pas d'action sur le cuivre, à la température ordinaire : il y a donc, dans toute la pile, dégagement d'électricité positive vers le liquide et d'électricité négative sur le zinc de chaque couple (715, 3°). Or, dans l'auge *b*, où le liquide est en même temps en contact avec un zinc et un cuivre, l'électricité positive du liquide se recompose constamment avec l'électricité contraire du couple *zc*; de même, dans l'auge *d*, le fluide positif du liquide se combine avec le fluide négatif du couple *z'c'*, et ainsi de suite dans toute la pile : en sorte qu'il n'y a que les électricités des auges extrêmes *a*

et *h* qui, ne pouvant s'unir à celles des auges voisines, restent libres. Il est facile de voir que c'est alors l'auge *a* qui est électrisée positivement par l'action de son acide sur le zinc *z*, et l'auge *h* qui l'est négativement par l'électricité que lui communique le couple *z''c''*. Toutefois, ces auges ne conservent ainsi qu'une très-faible portion des électricités développées par l'action chimique, parce que la plus grande partie des deux fluides se recompose : 1° au contact même du zinc et du liquide, à mesure que l'électricité naturelle est décomposée; 2° au travers de la pile, par les couples et le liquide acidulé.

Dans cette théorie, les électricités contraires des couples interpolaires formant constamment du fluide neutre, il en résulte que si l'on réunit les deux pôles par un circuit métallique, celui-ci n'est jamais traversé que par l'électricité développée par un seul couple. Quant à la tension des pôles, il est facile de voir qu'elle augmente avec le nombre des couples. En effet, M. de La Rive ayant trouvé que la conductibilité d'une masse liquide interrompue par des diaphragmes métalliques est en raison inverse de leur nombre, il s'ensuit que plus le nombre des couples interpolaires est considérable, plus les électricités contraires accumulées aux pôles rencontrent de résistance à leur recomposition, dans la pile, et plus la tension est forte. Il découle encore de là que, dans les couples interpolaires, la tension décroît des pôles vers le milieu de la pile, puisque l'intervalle des couples diminuant, la résistance à la recomposition est moindre. Par la même raison, la tension est nulle dans la partie centrale.

La résistance à la recomposition des électricités contraires accumulées aux deux pôles, augmentant quand le liquide interpolaire est moins conducteur, il doit en être de même de la tension. En effet, M. de La Rive a reconnu que les auges de la pile étant remplies d'eau acidulée, ou d'eau ordinaire, la tension est la même. Dans le premier cas, la production d'électricité est beaucoup plus grande, mais les fluides contraires se recomposent plus facilement.

La théorie de M. de La Rive s'applique à toutes les piles décrites précédemment, soit à un seul liquide, soit à deux (618 à 631).

717. **Transports opérés par les courants.** — Dans les décompositions chimiques opérées par la pile, il n'y a pas seulement séparation des éléments, mais transport des uns au pôle positif, et des autres au pôle négatif. Ce phénomène a été démontré par Davy, à l'aide de nombreuses expériences; nous citerons les deux suivantes :

1° Ayant versé une dissolution de sulfate de soude dans deux capsules réunies par une mèche d'amiante humectée de la même dissolution, on plonge l'électrode positive dans une des capsules, et l'électrode négative dans l'autre. Le sel est alors décomposé, et, au bout de quelques heures, tout l'acide sulfurique se trouve dans la première capsule, et la soude dans la seconde.

2° Trois verres A, B, C (fig. 538), contenant, le premier, une dissolution de sulfate de soude, le second du sirop de violette étendu, et le troisième de l'eau pure, on les fait communiquer entre eux par des mèches d'amiante humectées, puis on fait passer le courant de C vers A, par exemple. Le sulfate du verre A est alors décomposé, et bientôt la soude reste dans ce verre qui est négatif, tandis que tout l'acide est transporté dans le verre C, qui est positif. Si, au contraire, le courant va de A vers C, c'est la soude qui se rend en C, tandis que tout l'acide reste dans le verre A; mais, dans les deux cas, on observe ce phénomène remarquable que la teinture de violette du verre B n'est ni rougie ni verdie par le passage de l'acide ou de la base dans sa masse, phénomène dont on va voir l'explication.

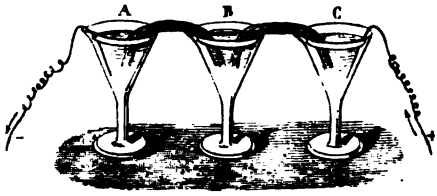


Fig. 538.

718. **Hypothèse de Grotthuss sur les décompositions électro-chimiques.** — Grotthuss a donné des décompositions électro-chimiques opérées par la pile, la théorie suivante : adoptant d'abord l'hypothèse que, dans tout composé binaire, ou se comportant comme tel, un des éléments est électro-positif, et l'autre électro-négatif (642), ce savant admet que sous l'influence des électricités contraires des électrodes de la pile, il se produit, dans le liquide où elles plongent, une suite de décompositions et de recompositions successives d'un pôle à l'autre, en sorte qu'il n'y a que les éléments des molécules extrêmes qui, ne se recomposant pas, restent libres et se portent aux pôles. L'eau, par exemple, étant formée d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène, et le

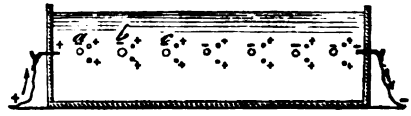


Fig. 539.

premier gaz étant électro-négatif, le second électro-positif, lorsque ce liquide est traversé par un courant suffisamment énergique, la molécule *a*, en contact avec le pôle positif, s'oriente comme le montre la figure 539, c'est-à-dire que l'oxygène se trouve attiré et l'hydrogène repoussé. L'oxygène de cette molécule se rendant alors sur l'électrode positive, l'hydrogène mis en liberté s'unit immédiatement à l'oxygène de la molécule *b*, puis l'hydrogène de celle-ci à l'oxygène de la molécule *c*, et ainsi de suite jusqu'au pôle négatif où les derniers atomes d'hydrogène sont mis en liberté et se rendent au pôle. La même théorie s'applique aux oxydes métalliques, aux acides et aux sels, et explique comment, dans l'expérience citée dans le paragraphe précédent, le sirop de violette du vase B n'a été rougi ni verdi.

719. **Lois des décompositions chimiques par la pile.** — M. Faraday a, le premier, fait connaître cette loi remarquable des décompositions par la pile : *Lorsqu'un même courant agit successivement sur une suite de dissolutions, les poids des éléments séparés sont dans le même rapport que leurs équivalents chimiques.*

Les expériences qui ont conduit à cette loi étaient faites au moyen de voltamètres (641) réunis entre eux par des fils de platine et traversés par le même courant. On a trouvé ainsi, avec des dissolutions salines de différents métaux, que les quantités de métal déposées sur les fils négatifs, dans les voltamètres, étaient respectivement proportionnelles aux équivalents de ces métaux.

720. **Polarité électrique.** — On nomme *polarité électrique* une propriété particulière qu'acquièrent les lames de platine qui ont servi à transmettre le courant dans un liquide décomposable. Cette propriété, qui a été signalée par M. de La Rive, consiste en ce que, retirées de la première dissolution et plongées dans l'eau pure, ces lames donnent naissance à un courant de sens inverse à celui qu'elles avaient servi à transmettre, ce que l'on constate en les faisant communiquer avec les extrémités du fil d'un galvanomètre. Le courant secondaire, ainsi développé, est d'autant plus intense, que l'action du premier courant a été prolongée plus longtemps.

M. Becquerel a donné l'explication de la polarité acquise par les métaux, en faisant voir qu'elle est due à ce que, dans la décomposition des sels, une couche d'acide s'attache à la lame qui joue le rôle d'électrode positive, et une couche de base à celle qui joue le rôle d'électrode négative ; car il suffit de plonger deux lames

de platine, l'une dans un acide, l'autre dans une dissolution alcaline, pour que ces deux lames aquièrent la polarité.

Les lames de platine qui ont servi à la décomposition de l'eau pure acquièrent aussi la polarité électrique, sans qu'on puisse l'attribuer à l'effet d'un acide ou d'une base; mais M. Matteucci a fait voir qu'elle provient alors de l'oxygène et de l'hydrogène qui adhèrent respectivement sur chaque lame.

721. Courants dérivés, lois de la dérivation. — Soit le courant d'une pile, d'un couple de Bunsen, par exemple, parcourant un fil de cuivre *rqpnm* (fig. 540); et considérons le cas où l'on réunit deux points quelconques *n* et *q* de ce circuit par un second fil *nxq*. Le courant de la pile se bifurquant alors au point *q*, se

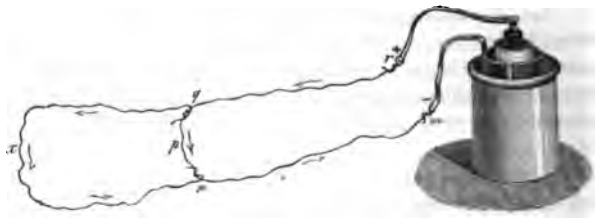


Fig. 540.

partage en deux autres, l'un qui continue à se propager dans le sens *qpnm*, et l'autre qui prend la direction *qxnm*.

Cela posé, les deux points *q* et *n*, d'où part et où aboutit le second conducteur, ont reçu le nom de *points de dérivation*, l'intervalle *qpn*, qui les sépare, celui de *distance de dérivation*, et le fil *qxn*, celui de *fil de dérivation*. Le courant qui parcourt le fil *qxn* se nomme le *courant dérivé;* le courant qui parcourait le circuit *rqpnm*, avant la dérivation, est le *courant primitif;* celui qui traverse le même conducteur, après la dérivation, est le *courant partiel;* et enfin on appelle *courant principal*, la totalité du nouveau courant qui parcourt tout l'ensemble du circuit quand on a ajouté le fil de dérivation.

M. Pouillet, qui a fait de nombreuses recherches sur les courants dérivés, est arrivé à ces lois, que l'*intensité du courant dérivé est directement proportionnelle à l'intensité du courant primitif et à l'intervalle de dérivation, mais en raison inverse de la section du fil dans cet intervalle, et aussi en raison inverse de la conductibilité du même fil.*

CHAPITRE X

INTENSITÉ ET VITESSE DES COURANTS ÉLECTRIQUES.

722. Rhéostat. — Le *rhéostat* sert à augmenter ou à diminuer la longueur du circuit que parcourt un courant, de manière à lui faire produire sur le galvanomètre une déviation déterminée. Cet appareil, dû à M. Wheatstone, se compose de deux cylindres parallèles, l'un A, de laiton, l'autre B, de bois (fig. 541). Ce dernier porte, dans toute sa longueur, une rainure en hélice, et se termine, à l'extrémité *a*, par un anneau de cuivre, auquel est fixée l'extrémité d'un fil fin de laiton. Ce fil, qui a 40 mètres de long, s'enroule plus ou moins dans la rainure, passe sur le cylindre A, et, après un grand nombre de tours sur ce cylindre, va se fixer à son extrémité *e*. Enfin, deux vis de pression *n* et *o*, qui maintiennent fixes les conducteurs du courant qu'on veut observer, communiquent par deux lames d'acier, l'une avec le cylindre de cuivre A, l'autre avec l'anneau *a*.

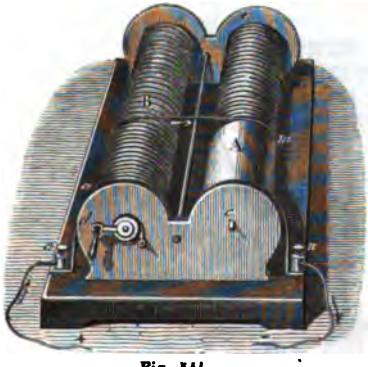


Fig. 541.

Cela posé, quand un courant entre en *o*, il traverse seulement la portion de fil enroulée sur le cylindre B, où les spires sont isolées par la rainure ; puis une fois arrivé sur le cylindre A, qui est métallique et en contact avec le fil, le courant passe directement de *m* en *n*. Par conséquent, si on veut augmenter la longueur du circuit, il suffit de tourner la manivelle *d* de droite à gauche. Si, au contraire, on veut la diminuer, on pose la manivelle sur l'axe *c*, et tournant alors de gauche à droite, on enroule le fil sur le cylindre A. On peut donc ainsi diminuer ou augmenter, à volonté l'intensité du courant, car on verra bientôt (724) que cette intensité est en raison inverse de la longueur du circuit. Quant à celle-ci, elle est donnée, en mètres et en centimètres, par deux aiguilles que

font mouvoir, sur l'extrémité de l'appareil non visible dans le dessin, les cylindres A et B, lorsqu'ils tournent ensemble.

723. **Boussole de sinus.** — La *boussole de sinus* est un galvanomètre destiné à mesurer les courants intenses, mais au moyen duquel on est dispensé d'avoir recours à une table de graduation

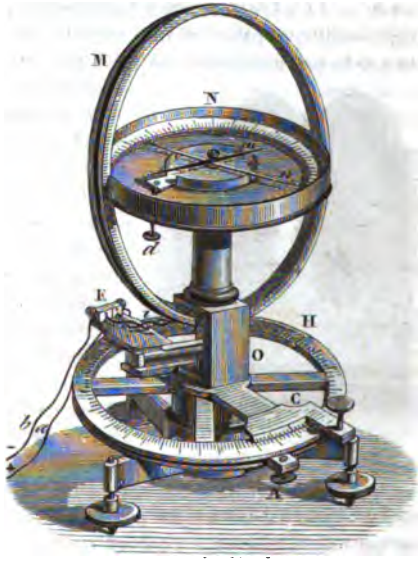


Fig. 542.

(651). Cet appareil, dû à M. Pouillet, diffère du galvanomètre déjà décrit, en ce que le fil de cuivre, dans lequel passe le courant, ne fait autour de l'aiguille aimantée qu'un très-petit nombre de tours, même quelquefois un seul. Au centre d'un cercle horizontal N (fig. 542) est une aiguille aimantée *m*; une deuxième aiguille *n*, de cuivre argenté, et mobile avec la première à laquelle elle est fixée, sert à repérer l'aiguille *m* sur le cercle gradué N. Un cercle M, en cuivre, est disposé perpendiculairement au cercle horizontal. C'est sur ce cercle M que s'enroule le fil de cuivre dans lequel passe le courant. Les deux bouts de ce fil, représentés en *i*, viennent se terminer à une pièce E, à laquelle aboutissent deux fils de cuivre *a* et *b*, en communication avec la source électrique dont on

veut mesurer le courant. Enfin, le cercle N et le cercle M sont portés par un pied O, qui peut tourner autour d'un axe vertical passant par le centre d'un cercle horizontal fixe H.

Cela posé, le circuit galvanométrique M étant dirigé dans le méridien magnétique, et, par conséquent, dans le même plan que l'aiguille, on fait passer le courant dans les fils *a* et *b*. Les aiguilles étant déviées, on tourne le circuit M jusqu'à ce qu'il coïncide avec le plan vertical passant par l'aiguille aimantée *m*. A ce moment, l'action directrice du courant s'exerçant perpendiculairement à la direction de l'aiguille aimantée, le calcul démontre que l'intensité du courant est proportionnelle au sinus de l'angle de déviation de cette aiguille, angle qui se mesure sur le cercle H, au moyen d'un vernier que porte la pièce C. C'est cette pièce qui, fixée au pied O, sert à le faire tourner, au moyen d'un bouton A, auquel elle est liée. L'angle de déviation connu, et par suite son sinus, on en déduit l'intensité du courant, puisqu'on vient de voir que cette intensité est proportionnelle au sinus.

Pour démontrer que l'intensité du courant est proportionnelle au sinus de l'angle de déviation, soient *mm'* (fig. 543) la direction du méridien magnétique, *d* l'angle de déviation, I l'intensité du courant, et T la force directrice de la terre. Si l'on représente par *ak* la direction et l'intensité de cette dernière force, on peut la remplacer par les deux composantes *ah* et *ac* (29). Or, la première n'ayant aucune action directrice sur l'aiguille, c'est la composante *ac* qui fait seule équilibre à la force I; il faut donc qu'on ait I = *ac*. Mais le triangle rectangle *ack* donne *ac* = *ak cos cak*, on *ac* = T *sin d*, l'angle *cak* étant le complément de l'angle *d*, et *ak* égal à T; donc enfin I = T *sin d*, ce qu'il fallait démontrer.

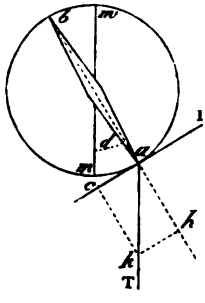


Fig. 543.

724. Lois de Ohm sur l'intensité des courants. — On appelle *courants de même intensité* ceux qui, dans les mêmes conditions, produisent la même déviation sur la même aiguille aimantée. Un grand nombre de physiciens, et particulièrement MM. Ohm, Fechner, Lenz, Jacobi, Pouillet, Faraday, de La Rive et Magnus, ont cherché à comparer, sous le point de vue de leur intensité, les courants électriques provenant de diverses sources. Ces recherches, qui ont été faites au moyen du galvanomètre, de la boussole de sinus et du rhéostat, ont conduit aux mêmes lois pour les courants thermo-électriques et pour les courants hydro-électriques. Seulement, pour les premiers, on néglige l'influence conductrice

de la pile, parce qu'étant métallique et de petite dimension, sa résistance est négligeable; mais il n'en est plus ainsi pour les courants hydro-électriques. Dans ce cas, il faut tenir compte de la résistance de la pile, ce que M. Pouillet fait en ajoutant à la longueur du fil interpolaire la longueur du fil qui, par sa résistance, produirait, sur le courant, la même diminution d'intensité que produit la pile elle-même par sa faible conductibilité. Le circuit entièrement métallique, qu'on suppose alors parcouru par le courant, est ce que M. Pouillet a nommé le *courant réduit*.

Cela posé, voici les différentes lois que présentent les courants électriques, quelle que soit la source qui leur donne naissance :

1° *L'intensité d'un courant est directement proportionnelle à la somme des forces électro-motrices qui sont en activité dans le circuit;* en entendant ici par force électro-motrice la cause, quelle qu'elle soit, qui produit un dégagement d'électricité dynamique;

2° *L'intensité est la même dans tous les points du circuit;*

3° *Elle est en raison inverse de la longueur réduite de toutes les parties du circuit;*

4° *Elle est en raison directe de la section et de la conductibilité du fil qui transmet le courant.*

Il découle des deux dernières lois que l'intensité reste constante quand la section du fil varie comme sa longueur.

M. Pouillet a trouvé que dans les liquides, comme dans les solides, l'intensité du courant est en raison directe de la section de la colonne liquide que traverse le courant, et en raison inverse de sa longueur, pourvu que celle-ci égale au moins cinq ou six fois le diamètre de la section.

Les lois qui précèdent sont connues sous le nom de *lois de Ohm*, parce que c'est ce savant qui, le premier, les a fait connaître il y a trente ans. Elles ont été trouvées par des considérations théoriques, mais MM. Lenz et Jacobi, et plus tard M. Pouillet, les ont vérifiées par l'expérience.

En représentant par E la somme totale des forces électro-motrices en activité dans la pile, par R la somme totale des résistances que rencontre l'électricité pour se propager, et par I l'intensité du courant, Ohm est arrivé à l'expression $I = \frac{E}{R}$.

Cette formule, qui comprend la première et la troisième lois ci-dessus, est générale, que le circuit qui réunit les deux pôles soit homogène ou non.

Si l'on représente par L la longueur du fil métallique qui réunit les pôles, par r la longueur du fil qui peut remplacer la résistance de la pile, ou la *longueur réduite* de celle-ci, la formule devient $I = \frac{E}{L + r}$.

Dans les piles thermo-électriques, où l'on peut négliger la résistance de la pile, toutes les pièces en étant métalliques et d'une très-faible longueur, la formule se réduit à $I = \frac{E}{L}$; c'est-à-dire que l'intensité du courant est simplement en raison inverse de la longueur du fil conjonctif.

Dans le cas de n couples égaux, associés en batterie, en appelant E la force électromotrice d'un seul couple et r sa résistance, Ohm admet qu'on a $I = \frac{nE}{L + nr}$; formule qui peut s'écrire $I = \frac{E}{\frac{L}{n} + r}$. Si le nombre n de couples est très-grand, et L très-petit, on peut négliger la fraction $\frac{L}{n}$, et la formule se réduit à $I = \frac{E}{r}$; c'est-à-dire que l'intensité est alors la même que pour un seul couple.

725. **Conductibilité pour les courants hydro-électriques.** — Le pouvoir conducteur des corps, pour les courants hydro-électriques, varie avec l'énergie des courants et avec les divers conducteurs que ceux-ci ont déjà traversés. M. de La Rive a reconnu, en effet, que les courants traversent d'autant plus facilement les plaques métalliques et les liquides, qu'ils en ont déjà traversé un plus grand nombre; propriété analogue à celle qu'on observe dans les pouvoirs diathermanes (362).

A l'aide du voltamètre (641), Davy a trouvé que la conductibilité d'un même métal est proportionnelle à la section du fil et en raison inverse de sa longueur. M. Becquerel a vérifié l'exactitude de cette loi au moyen d'un galvanomètre à deux fils. Quant à la conductibilité électrique des métaux différents, M. Ed. Becquerel a trouvé qu'à zéro leurs pouvoirs conducteurs relatifs peuvent être représentés par les nombres suivants : argent recuit, 100; cuivre recuit, 91,5; or recuit, 64,9; zinc, 24; étain, 14; fer, 12,3; plomb, 8,9; platine, 7,9; mercure, 1,739.

En comparant entre eux les pouvoirs conducteurs des divers liquides, et en prenant pour unité celui de l'eau distillée, M. Pouillet est arrivé aux résultats suivants : eau contenant $\frac{1}{10000}$ d'acide azotique, 6; eau saturée de sulfate de zinc, 167; eau saturée de sulfate de cuivre, 400. Quant au rapport entre la conductibilité des métaux et celle des liquides, cette dernière est immensément plus faible, car, d'après le même savant, le cuivre conduit 16 millions de fois plus que la dissolution saturée de sulfate de cuivre, ce qui revient à 6 milliards 400 millions de fois plus que l'eau distillée.

Enfin, on a observé que l'élévation de température augmente le pouvoir conducteur des liquides, tandis que c'est l'effet contraire qui a lieu pour les métaux.

La conductibilité des liquides composés a été considérée jusqu'ici, par la plupart des physiciens, comme une conductibilité purement *électrolytique*, c'est-à-dire due à la décomposition chimique (640). Cependant, M. Faraday, en faisant connaître sa loi générale des décompositions électrolytiques (719), avait annoncé lui-même qu'elle comporterait quelques restrictions dans le cas où les liquides seraient capables de conduire l'électricité sans subir de décomposition.

La conductibilité purement électrolytique a surtout été soutenue par M. Buff; mais M. Léon Foucault a démontré récemment, par des expériences délicates, que les liquides possèdent aussi une conductibilité propre, ou *conductibilité physique*, à la manière des métaux; seulement cette dernière est beaucoup plus faible que la conductibilité électrolytique, mais peut cependant avoir une influence sensible sur les effets chimiques des courants et sur la loi de M. Faraday.

726. **Vitesse de l'électricité.** — De nombreuses tentatives ont été faites pour déterminer la vitesse de propagation de l'électricité dans des fils métalliques. En 1834, M. Wheatstone fit usage d'un miroir tournant semblable à celui déjà décrit en parlant de la vitesse de la lumière (fig. 230, p. 369). D'après le retard qu'éprouvait, dans un temps donné, l'image de l'étincelle produite par une bouteille de Leyde, lorsque l'électricité passait dans un long fil, M. Wheatstone trouva que l'électricité, dans un fil de laiton de 2 millimètres de diamètre, se propageait avec une vitesse de 460 000 kilomètres par seconde, vitesse qui correspond à une fois et demie celle de la lumière. M. Walker, en Amérique, ayant fait, en 1840, des recherches sur le même sujet, au moyen de signaux transmis par les fils de télégraphes électriques, trouva que la vitesse de l'électricité était de 30 000 kilomètres par seconde, nombre 15 fois plus petit que le précédent.

En 1850, MM. Fizeau et Gounelle, en expérimentant sur les fils télégraphiques de Paris à Amiens et à Rouen, sont arrivés aux résultats suivants :

1° Dans un fil de fer dont le diamètre est de 4 millimètres et demi, l'électricité se propage avec une vitesse de 101 700 kilomètres par seconde;

2° Dans un fil de cuivre d'un diamètre de 2 millimètres et demi, la vitesse est de 177 700 kilomètres;

3° Les deux électricités se propagent avec la même vitesse;

4° Le nombre et la nature des éléments dont la pile est formée,

et, par conséquent, la tension de l'électricité et l'intensité du courant, n'ont pas d'influence sur la vitesse de propagation;

5° Dans des conducteurs de nature différente, les vitesses ne sont pas proportionnelles aux conductibilités électriques.

Dans des expériences faites entre les observatoires de Greenwich et d'Édimbourg, avec des fils de cuivre, on a trouvé 12 200 kilomètres pour la vitesse de l'électricité; et entre les observatoires de Greenwich et de Bruxelles, à l'aide d'un fil sous-marin, on a trouvé seulement 4 300 kilomètres; mais, dans ce dernier cas, le fil de cuivre, recouvert de gutta-percha, était en grande partie plongé dans la mer. M. Faraday a fait voir que cette énorme différence est due à l'action par influence que le fil exerce au travers de la gutta-percha sur le liquide dans lequel il est plongé (700). Ce sont donc les nombres de MM. Fizeau et Gounelle qui paraissent représenter avec plus de fidélité la vitesse de l'électricité dans les fils métalliques.

CHAPITRE XI

ÉLECTRICITÉ ANIMALE, APPLICATION DE L'ÉLECTRICITÉ A LA THÉRAPEUTIQUE.

727. Courant propre des animaux. — On a déjà vu que l'électricité animale a été un sujet de vive discussion entre les physiologistes et les physiciens (615 et 616). Depuis Galvani, de nombreuses recherches ont été faites sur cette matière, notamment par MM. Aldini, Humboldt, Lehot, Nobili, Marianini et Matteucci.

M. Nobili, le premier, a observé avec le galvanomètre, dans des grenouilles préparées comme celle de Gavarni (fig. 437), un courant qu'il a nommé *courant propre* de la grenouille. Pour cela, il plongeait les membres cruraux de la grenouille dans une capsule pleine d'eau salée, puis les nerfs lombaires dans une seconde capsule remplie d'une semblable dissolution, et il fermait le circuit en plongeant dans chacune des capsules un des bouts du fil d'un galvanomètre très-sensible. Or, il obtenait ainsi une déviation de 10 à 30 degrés, indiquant un courant dirigé des pieds à la tête de l'animal.

M. Matteucci a obtenu des effets analogues en formant des piles de cuisses de grenouilles. Pour cela il prenait des moitiés de cuisses de grenouilles, les plus rapprochées de la jambe, et dépouillées, auxquelles il avait conservé leur nerf lombaire, et il les disposait les unes à la suite des autres, de manière que le nerf de chacune s'appuyât sur la partie musculaire de la suivante. Fermant ensuite le circuit avec le fil d'un galvanomètre, M. Matteucci a obtenu, avec huit moitiés de cuisses, une déviation de 12 degrés.

Le même physicien a aussi formé des piles de cuisses de grenouille en enlevant le nerf lombaire et en faisant toucher l'intérieur du muscle de chaque cuisse à la sur-

face externe de la cuisse suivante. Toujours il a observé, dans les muscles de ces animaux, vivants ou récemment tués, un courant, quand le circuit est fermé, allant de l'intérieur du muscle à sa surface. M. Matteucci désigne ce courant sous le nom de *courant musculaire*, qu'il distingue du *courant propre* de la grenouille. Dans celle-ci il a toujours rencontré en même temps les deux courants, tandis que dans les autres animaux il n'a jamais observé que le courant musculaire.

M. du Bois-Reymond a fait connaître récemment de nouvelles recherches sur les courants musculaires dans l'homme. Dans ces expériences, il a fallu, vu la grande résistance du corps humain, faire usage d'un galvanomètre à vingt-quatre mille tours. M. du Bois-Reymond a constaté qu'en faisant communiquer les deux bouts du fil galvanométrique, avec deux points symétriques du corps, par exemple avec les deux mains ou les deux pieds, le galvanomètre donne d'abord des indications très-irrégulières; mais bientôt il se produit un courant dont la direction demeure constante lorsqu'on répète plusieurs fois l'expérience, même à des intervalles éloignés. Ce courant n'a pas la même intensité chez des individus différents; il peut même changer de direction chez un même sujet, mais seulement à des époques éloignées, car il persiste quelquefois avec une direction constante pendant plusieurs mois.

728. **Poissons électriques.** — On nomme *poissons électriques* des poissons qui possèdent la propriété remarquable, lorsqu'on les irrite, de faire ressentir à ceux qui les touchent des commotions comparables à celles de la bouteille de Leyde. Il existe plusieurs espèces de poissons électriques, dont les plus connus sont la torpille, le gymnote et le sylure. La torpille, qui est très-commune dans la Méditerranée, a été étudiée avec beaucoup de soin par MM. Becquerel et Breschet, en France, et par M. Matteucci, en Italie. Le gymnote l'a été par MM. de Humboldt et Bompland, dans l'Amérique du Sud, et par M. Faraday, en Angleterre, ce physicien s'en étant procuré de vivants.

La commotion que donnent les poissons électriques leur sert d'arme offensive et défensive; elle est toute volontaire de leur part, et s'affaiblit graduellement, à mesure qu'elle se renouvelle, et que ces animaux perdent de leur vitalité, car l'action électrique détermine promptement en eux un épuisement considérable.

Cette commotion est très-violente. D'après M. Faraday, la commotion donnée par le gymnote équivaut à celle d'une batterie électrique de 15 bocaux (605), dont la surface totale des armatures serait de deux mètres carrés et un quart, ce qui explique comment des chevaux succombent quelquefois sous les décharges réitérées des gymnotes.

Plusieurs expériences prouvent que les commotions ont bien pour cause l'électricité ordinaire. En effet, si touchant d'une main le dos de l'animal on touche le ventre avec l'autre main ou avec une tige métallique, on ressent une violente commotion dans les poignets et dans les bras, tandis que si on touche avec un corps isolant, il n'y a pas de commotion. De plus, quand on fait communiquer les deux bouts du fil du galvanomètre, l'un avec le dos de l'animal, l'autre avec le ventre, à chaque décharge, l'aiguille est déviée et revient immédiatement au zéro, ce qui montre qu'il y a courant instantané; de plus, le sens de la déviation indique que le courant va du dos au ventre du poisson. Enfin, si l'on fait passer le courant d'une torpille dans une hélice au centre de laquelle est un petit barreau d'acier (fig. 490), celui-ci est aimanté par le passage de la décharge.

Au moyen du galvanomètre, M. Matteucci a constaté les faits suivants :

1° Quand une torpille est vivace, elle peut donner la commotion par un point quelconque de son corps; mais à mesure que la vitalité de l'animal s'épuise, les points d'où il peut donner la commotion se rapprochent de plus en plus de l'organe qui sert de siége au développement de l'électricité.

2° Un point quelconque du dos est toujours positif par rapport au point correspondant du ventre.

3° De deux points inégalement éloignés de l'organe électrique, le plus rapproché joue toujours le rôle de pôle positif, et le plus éloigné celui de pôle négatif. C'est l'inverse qui a lieu pour les points du ventre.

Quant à l'organe où l'électrité prend naissance dans la torpille, il est double et formé de deux parties symétriques situées des deux côtés de la tête, et s'attachant aux os du crâne par leur face interne. Ces deux parties se réunissent entre elles en avant des os du nez, mais sont séparées de la peau par une forte aponévrose. D'après M. Matteucci, chacun de ces organes est formé d'un nombre assez considérable de petites masses prismatiques placées les unes à côté des autres, et allant de la face externe à la face interne, de manière que leur section perpendiculaire aux arêtes des prismes offre l'aspect des alvéoles d'un rayon de miel. Ces prismes perpendiculairement à leurs arêtes, sont divisés par une suite de diaphragmes, formant une série de petites vésicules identiques entre elles, et remplies de 9 parties d'eau pour 1 d'albumine, et d'un peu de sel marin.

M. Matteucci, s'appuyant sur l'expérience suivante, regarde chacune de ces vésicules comme l'organe élémentaire de l'appareil électrique. Il enlève de l'appareil d'une torpille vivante une masse de ces vésicules de la grosseur de la tête d'une forte épingle, et la met en contact avec les nerfs d'une grenouille morte, préparée à la manière de Galvani (fig. 437). Or, il observe que lorsqu'il excite cette masse vésiculaire en la piquant avec un corps pointu, des contractions se manifestent dans la grenouille.

M. Matteucci, a, en outre, cherché l'influence du cerveau sur la décharge. Pour cela, il a mis à nu le cerveau d'une torpille vivante, et il a observé que les trois premiers lobes peuvent être irrités sans que la décharge se produise, et que, s'ils sont enlevés, l'animal possède encore la faculté de donner la commotion. Le quatrième lobe, au contraire, ne peut être irrité sans qu'aussitôt la décharge se manifeste; mais s'il est enlevé, tout dégagement d'électricité disparaît, même si les autres lobes restent intacts. On est donc conduit à admettre que la source première de l'électricité élaborée serait le quatrième lobe, d'où elle serait transmise, par l'intermédiaire des nerfs, aux deux organes décrits ci-dessus, lesquels agiraient comme multiplicateurs. Dans le silure, c'est aussi le cerveau qui paraît être le point de départ de l'électricité; mais dans le gymnote, il se trouve placé dans la queue.

C'est en se fondant sur la quantité considérable d'électricité dégagée dans l'économie de certains poissons, que les physiciens ont cherché si une semblable élaboration d'électricité n'a pas lieu dans les autres animaux, non plus en quantité suffisante pour donner des commotions comparables à celle de la bouteille de Leyde, mais assez pour produire des actions lentes, et servir à des fonctions essentielles à la vie, comme les sécrétions, la digestion, etc.

729. Application de l'électricité à la thérapeutique. — Les premières applications de l'électricité à la médecine remontent à la découverte de la bouteille de Leyde. Nollet et Boze paraissent être les premiers physiciens qui pensèrent à l'application de l'électricité, et bientôt la piqûre et les frictions électriques devinrent une panacée universelle; mais, il faut en convenir, les premiers essais ne répondirent pas aux espérances des expérimentateurs.

Aussitôt après la découverte de l'électricité dynamique, Galvani en proposa l'application à la médecine; depuis, un grand nombre de physiciens et de physiologistes se sont occupés de cette question, et cependant il règne encore aujourd'hui une grande incertitude sur les effets réels de l'électricité, sur les cas où on doit l'appliquer, et enfin sur le meilleur mode d'application. Toutefois, les praticiens sont d'accord pour

préférer l'usage des courants à celui de l'électricité statique, et, sauf un petit nombre de cas, les courants interrompus aux courants continus. Enfin, il y a encore un choix à faire entre les courants de la pile et les courants d'induction (686); de plus, les effets de ceux-ci ne sont pas les mêmes, suivant qu'on fait usage de courants d'induction du premier ou du deuxième ordre (693).

En effet, les courants d'induction, quoique très-intenses, ayant une action chimique très-faible, il en résulte que lorsqu'ils traversent les organes, ils n'y produisent pas les effets chimiques des courants de la pile, et, par suite, ne tendent pas à y produire la même désorganisation. De plus, pour l'électrisation des muscles de la face, les courants d'induction doivent être préférés, car le docteur Duchenne, qui a fait de nombreuses recherches sur les applications médicales de l'électricité, a constaté que ces courants n'agissent que très-faiblement sur la rétine, tandis que les courants de la pile agissent très-vivement sur cet organe et peuvent l'affecter dangereusement, comme de fâcheux accidents l'ont prouvé. Quant aux courants induits de différents ordres, d'après le docteur Duchenne, tandis que le courant induit du premier ordre détermine des contractions musculaires vives, mais a peu d'effet sur la sensibilité cutanée, le courant induit du deuxième ordre, au contraire, exalte la sensibilité cutanée, à tel point qu'on doit en proscrire l'emploi chez les personnes dont la peau est très-irritable.

De ce qui précède il faut conclure qu'on ne doit appliquer les courants à la thérapeutique qu'avec une connaissance approfondie de leurs différentes propriétés. De plus, on ne doit s'en servir qu'avec beaucoup de prudence, car leur action trop prolongée peut amener des accidents graves. M. Matteucci, dans ses Leçons sur les phénomènes physiques des corps vivants, s'exprime ainsi : « Il faut toujours commencer par employer un courant très-faible. Cette précaution me semble aujourd'hui plus importante que je ne l'avais cru avant d'avoir vu un paralytique être pris de convulsions vraiment tétaniques sous l'action d'un courant fourni par un seul élément. Ayez soin de ne jamais trop en prolonger le passage, surtout si le courant est énergique. Appliquez le courant interrompu plutôt que le courant continu; mais, après *vingt* ou *trente* secousses au plus, laissez prendre au malade quelques instants de repos. »

On a imaginé de nombreux appareils pour appliquer à la thérapeutique les courants interrompus, obtenus soit par l induction des courants, soit par l'induction des aimants, soit par la pile même. Le premier appareil paraît avoir été construit à Paris, par le docteur Rognetta, Italien. Depuis, MM. Masson, Dujardin, Glœsner, Breton, Duchenne, ont fait connaître différents appareils de ce genre. Nous décrirons trois de ces appareils : deux dus au docteur Duchenne, et donnant, l'un le courant induit du premier ordre, l'autre le courant induit du premier ou du deuxième ordre, à volonté; le troisième appareil, inventé par M. Pulvermacher, donne le courant ordinaire de la pile, mais interrompu et avec une grande tension.

730. **Appareil électro-voltaïque du docteur Duchenne.** — Cet appareil se compose d'une bobine à deux fils, analogue à celle déjà décrite en parlant des courants d'induction (fig. 508), et renfermée dans un étui de laiton V (fig. 544). Cette bobine est fixée sur une boîte de bois dans laquelle sont deux tiroirs. Le premier contient une boussole faisant l'office de galvanomètre, et servant à mesurer l'intensité du courant inducteur par la déviation qu'il imprime à l'aiguille. Le second renferme une pile à charbon disposée de manière à présenter le plus petit volume possible. L'élément zinc Z a lui-même la forme d'un petit tiroir dans lequel est une solution de sel marin et une plaque rectangulaire, en charbon de coke bien calciné, comme celui de la pile de Bunsen. Dans la partie centrale du charbon est une petite cavité O où l'on verse une faible quantité d'acide azotique qui est absorbée. Deux petites lames de cuivre L et N communiquent, la première avec le zinc et représente

le pôle négatif, la seconde avec le charbon et représente le pôle positif. Quand les tiroirs sont fermés, les pôles L et N sont en contact avec les bouts inférieurs des boutons de cuivre E et C; de ces derniers partent deux fils de cuivre EF et CB qui conduisent le courant aux pièces H et G, dont la première est mobile. Quand elle est abaissée, le courant passe; mais si elle est relevée, comme le montre le dessin, le courant est interrompu.

Le courant induit ne prenant naissance qu'au moment où le courant inducteur commence ou finit, il importe que ce dernier éprouve des intermittences continuelles. Dans l'appareil du docteur Duchenne, ces intermittences peuvent être rapides ou lentes, à volonté. Pour les intermittences rapides, le courant passe dans une pièce A

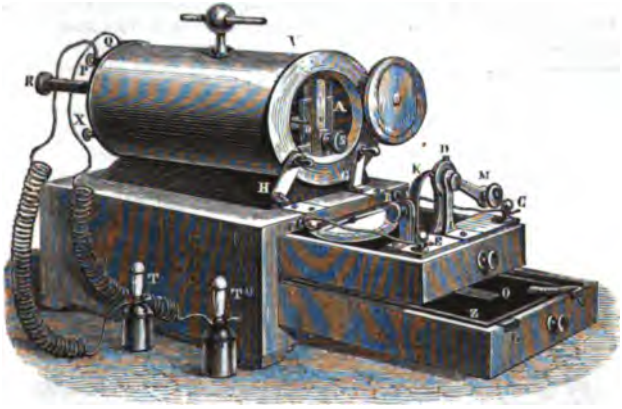


Fig. 544 (h = 35).

de fer doux, qui oscille très-vite sous l'influence d'un faisceau de fil de fer doux placé dans l'axe de la bobine et s'aimantant temporairement quand le courant passe. C'est cette pièce A qui, dans son mouvement de va-et-vient, interrompt et rétablit le courant inducteur, et par suite faire naître le courant induit.

Pour les intermittences lentes, on fixe la pièce oscillante au moyen d'une petite tige *a*, puis, au lieu de faire passer le courant par la pièce A, on le fait passer par une lame élastique K et par les dents d'une roue de bois D, qui sont en métal et en communication avec le pied I et le bouton C. En tournant la manivelle M, le courant s'interrompt toutes les fois que la lame K cesse de toucher une dent; et comme il y a quatre dents, il y a quatre intermittences par révolution, ce qui permet, en tournant plus ou moins vite, de varier à volonté le nombre des intermittences, et par suite des commotions, dans un temps donné.

Pour transmettre les commotions, on fait arriver les bouts du fil induit à deux boutons P et Q, sur lesquels on fixe deux longs fils de cuivre recouverts de soie et terminés par deux excitateurs à manche de verre T, T. Ce sont ces excitateurs qu'on applique sur les organes, de manière à faire passer le courant dans telle partie du corps qu'on veut.

Enfin, l'appareil porte un *graduateur* destiné à faire varier l'intensité du courant. Ce graduateur consiste en un cylindre de cuivre rouge qui enveloppe la bobine et

qui peut se tirer plus ou moins, comme un tiroir, à l'aide d'une tige graduée R. Le maximum d'intensité a lieu quand le graduateur est tiré de manière à découvrir tout à fait la bobine, et le minimum quand il la recouvre. Cette influence du cylindre-enveloppe, observée par M. Dore et par M. Duchenne, s'explique par des courants d'induction qui se produisent dans sa masse.

731. Appareil électro-magnétique du docteur Duchenne. — M. Duchenne emploie aussi, dans sa pratique, un second appareil dans lequel il ne fait plus usage de la pile, mais de l'action inductrice d'un fort aimant, pour développer le courant, ainsi que cela a lieu dans l'appareil de Clarke (694). L'aimant KK (fig 545) est à deux branches, réunies à leurs extrémités postérieures par une armature de fer doux ; devant leurs extrémités antérieures est une armature C, aussi en fer doux, libre de tourner sur un axe horizontal auquel le mouvement est transmis à l'aide d'un pignon O, d'une grande roue A, d'une chaîne à la Vaucanson et d'une manivelle M.

Sur les deux branches des aimants s'enroule un fil de cuivre recouvert de soie

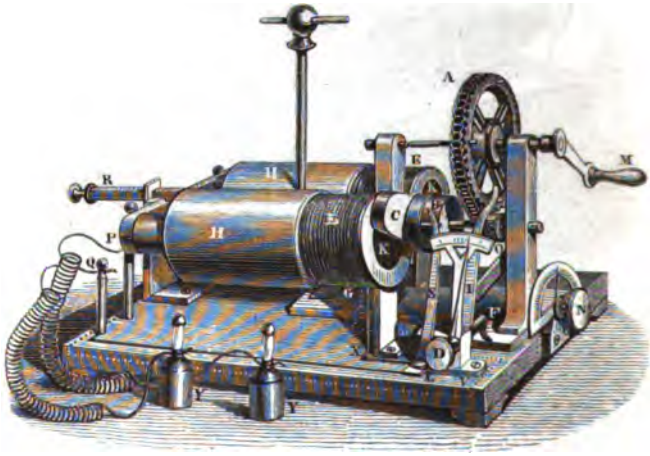


Fig. 545 (h = 36

destiné à recevoir l'induction des aimants; puis, sur le premier fil, un second EE destiné à recevoir le courant induit de deuxième ordre.

Cela posé, lorsqu'on imprime à la pièce C un mouvement de rotation plus ou moins rapide, cette pièce s'aimantant à chaque passage devant les pôles des aimants KK, exerce dans ceux-ci, sur la distribution du magétisme, une réaction qui fait naître dans le premier fil un courant d'induction du premier ordre, tandis que celui-ci développe, en même temps, dans le fil EE, un courant induit du deuxième ordre. Ces courants peuvent se recueillir à part, à l'aide d'un système de pièces P ou Q, qui sont doubles chacune, mais dont, pour chaque système, une seule est visible sur notre dessin. Le courant se rend ensuite, par des fils de cuivre enroulés en hélice, sur deux excitateurs Y, Y, qu'on tient à la main par deux manches de verre, et qu'on

porte à volonté sur les parties malades pour y faire passer le courant. Quant aux intermittences nécessaires à la formation des courants induits, elles s'obtiennent à l'aide d'un commutateur B, analogue à celui de l'appareil de Clarke, et à l'aide d'une suite de pièces S, I, D, F, dans le détail desquelles nous n'entrerons pas.

Enfin, on règle l'intensité des commotions au moyen d'un bouton à vis N, qui sert à rapprocher ou à écarter des aimants la pièce C. Mais le principal régulateur se compose de deux cylindres de cuivre rouge HH, qui enveloppent les bobines, et peuvent en recouvrir une partie plus ou moins grande, d'après le tirage qu'on imprime à un tiroir R, auquel ils sont fixés. Les commotions atteignent leur minimum d'intensité lorsque les cylindres recouvrent en entier les bobines, le maximum quand celles-ci sont entièrement découvertes, phénomènes qui s'expliquent par les courants d'induction qui se développent dans la masse des cylindres.

Ne pouvant décrire ici les effets thérapeutiques de ces appareils, nous nous bornerons à dire que leur efficacité a été constatée surtout dans les paralysies, et, plus particulièrement, dans les paralysies saturnines; pour plus de détails, nous renvoyons le lecteur au grand ouvrage qu'a publié M. le docteur Duchenne, sous le titre *De l'électrisation localisée et de son application à la physiologie, à la pathologie et à la thérapeutique*.

732. Chaîne galvanique de M. Pulvermacher. — M. Pulvermacher a imaginé récemment une nouvelle pile, remarquable par sa grande tension et par la

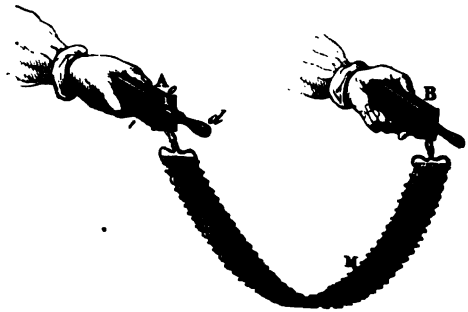


Fig. 546.

facilité avec laquelle on la fait fonctionner. Cette pile, qui a beaucoup de rappor avec la pile à colonne (618), est représentée dans la figure 546, au moment où on reçoit la commotion. La figure 547 en représente les détails.

Elle se compose d'une suite de petits cylindres de bois M et N, sur lesquels s'enroulent, l'un à côté de l'autre, sans se toucher, un fil de zinc et un fil de cuivre. A chacun de ses bouts, le fil de zinc *ab* du cylindre M s'articule au fil de cuivre du cylindre N, au moyen de deux petits anneaux de cuivre implantés dans le bois; puis le zinc du cylindre N se relie de même au cuivre du troisième cylindre, et ainsi de suite, de manière que constamment le zinc d'un cylindre forme, avec le cuivre du suivant, un couple tout à fait comparable à ceux de la pile à colonne. Le tout formant ainsi une espèce de chaîne qu'on tient par les deux bouts, on plonge cette chaîne dans un verre contenant du vinaigre plus ou moins étendu d'eau. Les petits cylindres de bois, qui sont poreux, s'imbibant alors du liquide, font l'office des rondelles acidulées

de la pile à colonne, et l'action chimique, qui se produit entre le zinc et l'acide acétique, donne naissance à un courant d'autant plus intense que les couples sont plus nombreux. Avec une chaine de 120 couples, on reçoit de très-fortes secousses.

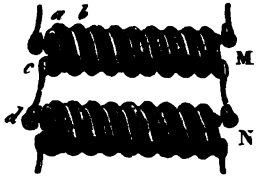


Fig. 547.

Pour interrompre le courant, ce qui est nécessaire pour les commotions, M. Pulvermacher fait usage de deux armatures A et B (fig. 546) auxquelles sont fixés les deux pôles de la pile M. L'armature B ne sert qu'à mieux établir le contact avec la main; mais l'armature A, qui a le même usage, sert, en outre, à l'interruption du courant. Pour cela, elle contient un petit mouvement d'horlogerie qui fait osciller une pièce de manière que tantôt le pôle de la pile communique intérieurement avec la paroi *i* de l'armature, et tantôt il n'y communique pas. La rapidité des oscillations et par suite le nombre des secousses peuvent varier dans de certaines limites, à l'aide d'un petit régulateur *o* qu'on fait marcher à la main. Enfin le mouvement d'horlogerie se monte en tournant une clef *d* qui sert de poignée à l'armature.

ÉLÉMENTS

DE MÉTÉOROLOGIE ET DE CLIMATOLOGIE.

MÉTÉOROLOGIE.

733. **Objet de la météorologie.** — On nomme *météores* les phénomènes qui se produisent dans l'atmosphère, et *météorologie* la partie de la physique qui a pour objet l'étude des météores.

On distingue des météores *aériens*, qui sont les vents, les ouragans et les trombes; des météores *aqueux*, qui comprennent les brouillards, les nuages, la pluie, la rosée, le serein, la neige, la grêle; et des météores *lumineux*, comme la foudre, l'arc-en-ciel, les aurores boréales.

Météores aériens.

734. **Direction et vitesse des vents.** — Les *vents* sont des courants qui se manifestent dans l'atmosphère suivant des directions et avec des vitesses très-variables. Quoiqu'ils soufflent dans toutes les directions, on en distingue huit principales, qui sont le *nord*, le *nord-est*, l'*est*, le *sud-est*, le *sud*, le *sud-ouest*, l'*ouest* et le *nord-ouest*. Les marins partagent en outre les intervalles entre ces huit directions en quatre autres, ce qui fait en tout 32 directions, qu'on désigne respectivement sous le nom de *rhumb*. Le tracé de ces 32 rhumbs sur un cercle, en forme d'étoile, est connu sous le nom de *rose des vents*.

La direction du vent se détermine à l'aide de girouettes; quant à sa vitesse, elle se mesure au moyen de l'*anémomètre*. On nomme ainsi un petit moulinet à ailettes que le vent fait tourner; du nombre de tours faits en un temps donné, on déduit la vitesse. Dans nos climats, la vitesse moyenne est de 5 à 6 mètres par seconde. Avec une vitesse de 2 mètres, le vent est modéré; avec 10 mètres, il est frais; avec 20 mètres, il est fort; avec 25 mètres, il y a tempête; et avec 40 mètres, ouragan.

735. **Causes des vents.** — Les vents ont pour cause une rupture d'équilibre dans quelque partie de l'atmosphère, rupture qui résulte toujours d'une différence de température entre les pays voisins. Par exemple, si la température du sol s'élève sur une certaine étendue, l'air en contact avec lui s'échauffe, se dilate et monte vers les hautes régions de l'atmosphère, où il s'écoule en produisant des vents qui soufflent des contrées chaudes vers les contrées froides. De plus, l'équilibre se trouvant rompu, en même temps, au niveau du sol, par l'excès de poids qui se produit latéralement sur les couches supérieures de l'atmosphère, par suite de l'air qui s'y est déversé, il en résulte, dans les couches inférieures, des courants en sens contraire des premiers.

736. **Vents réguliers, vents périodiques et vents variables.** — D'après la direction plus ou moins constante suivant laquelle soufflent les vents, on peut les classer en trois grandes divisions : les vents réguliers, les vents périodiques et les vents variables.

1° On nomme *vents réguliers* des vents qui soufflent toute l'année dans une direction sensiblement constante. Ces vents, connus aussi sous le nom de *vents alizés*, s'observent, loin des côtes, sans interruption, dans les régions équatoriales, soufflant du nord-est au sud-ouest dans l'hémisphère boréal, et du sud-est au nord-ouest dans l'hémisphère austral. Ils règnent, des deux côtés de l'équateur, jusqu'à 30 degrés de latitude, et leur direction est de même sens que le mouvement apparent du soleil, c'est-à-dire de l'est à l'ouest.

Les vents alizés ayant nécessairement pour cause, comme les autres vents, des variations de température dans l'atmosphère, on les explique par l'échauffement qui se produit de l'orient vers l'occident par la rotation de la terre. Par l'effet de cet échauffement, l'air des régions équatoriales s'élevant constamment dans l'atmosphère, est remplacé par de l'air plus dense arrivant, dans chaque hémisphère, du pôle vers l'équateur; mais ces courants se combinant avec le mouvement de rotation, prennent, par rapport à l'équateur, la direction inclinée et constante qui constitue les vents alizés.

2° Les *vents périodiques* sont des vents qui soufflent régulièrement dans la même direction, aux mêmes saisons ou aux mêmes heures de la journée; tels sont la mousson, le samoun et la brise. On nomme *mousson* des vents qui soufflent six mois dans une direction, six mois dans une autre. On les observe principalement dans la mer et dans le golfe d'Arabie, dans le golfe du Ben-

gale et dans la mer de Chine. Ces vents sont dirigés vers les continents dans l'été, et en sens contraire dans l'hiver.

Le *samoun* est un vent brûlant qui souffle des déserts de l'Asie et de l'Afrique, et qui est caractérisé par sa haute température et par les sables qu'il élève dans l'atmosphère et transporte avec lui. Quand ce vent souffle, l'air s'obscurcit, la peau se dessèche, la respiration s'accélère et la soif devient ardente.

Ce vent est connu sous le nom de *sirocco* en Italie et à Alger, où il souffle du grand désert de Sahara. Il porte le nom de *chamsin* en Égypte, où il se fait sentir depuis la fin d'avril jusqu'en juin. Pour se préserver des effets d'une transpiration cutanée trop rapide occasionnée par ce vent, les indigènes de l'Afrique s'enduisent le corps de graisse.

La *brise* est un vent qui souffle sur les côtes, de la mer vers la terre, le jour, et de la terre vers la mer, la nuit; c'est-à-dire de la région la plus froide vers la région la plus chaude. En effet, le sol s'échauffant plus que la mer, pendant le jour, l'air dilaté sur le continent plus que sur la mer s'élève et est remplacé par un courant d'air plus dense, arrivant de la mer sur la terre. La nuit, le sol se refroidissant plus que l'eau de la mer par le rayonnement, le même phénomène se reproduit en sens contraire. La brise de mer commence après le lever du soleil, augmente jusqu'à trois heures de l'après-midi, décroît jusqu'au soir, et se change en brise de terre après le coucher du soleil. Les brises de mer et de terre ne se font sentir qu'à de faibles distances des côtes. Les brises sont régulières entre les tropiques, le sont moins dans nos contrées, et on en observe des traces jusque sur les côtes du Groënland. Le voisinage des montagnes donne aussi naissance à des brises périodiques diurnes.

3° Les *vents variables* sont des vents qui soufflent tantôt dans une direction, tantôt dans une autre, sans qu'on puisse constater aucune loi qui préside à leur direction. Dans les latitudes moyennes, la direction des vents est très-variable; en avançant vers les pôles, cette irrégularité augmente, et, sous la zone glaciale, les vents soufflent parfois de plusieurs points de l'horizon. Au contraire, en approchant de la zone torride, ils deviennent de plus en plus réguliers. C'est le vent du sud-ouest qui domine dans le nord de la France, en Angleterre et en Allemagne; dans le midi de la France, la direction des vents incline davantage vers le nord, et en Espagne et en Italie, c'est le vent du nord qui est prédominant.

737. **Trombe.** — Les *trombes* sont des amas de vapeurs en suspension dans les couches inférieures de l'atmosphère qu'elles traversent animées, le plus souvent, d'un mouvement giratoire assez rapide pour déraciner les arbres, renverser les maisons, briser et détruire tout ce qu'elles rencontrent.

Ces météores, qui sont généralement accompagnés de grêle et de

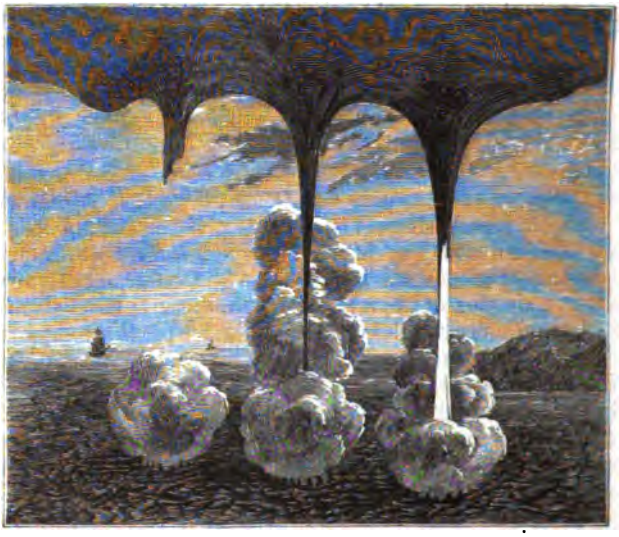


Fig. 548.

pluie, lancent souvent des éclairs et la foudre, en faisant entendre. sur toute la zone qu'ils parcourent, le bruit d'une charrette roulant sur un chemin rocailleux. Un grand nombre de trombes ne possèdent pas de mouvement giratoire, et le quart environ de celles qu'on observe prend naissance dans une atmosphère calme.

Les trombes se manifestent aussi bien sur les mers que sur les continents, et alors le phénomène présente un aspect remarquable. Les eaux s'agitent et s'élèvent en forme de cône, tandis que les nuages s'abaissant eux-mêmes sous la forme d'un cône renversé, les deux cônes se réunissent par leur sommet et forment une colonne continue de la mer aux nues (fig. 548). Cependant, même en pleine mer, l'eau des trombes n'est jamais salée, ce qui prouve

qu'elles sont surtout formées de vapeurs condensées, et non de l'eau de la mer élevée par aspiration.

L'origine des trombes n'est pas connue. M. Kæmtz admet qu'elles sont dues principalement à deux vents opposés qui passent l'un à côté de l'autre, ou bien à un vent très-vif qui règne dans les hautes régions de l'atmosphère. Peltier et beaucoup d'autres physiciens rapportent les trombes à une cause électrique.

Météores aqueux.

738. **Brouillards.** — Les *brouillards* sont des masses de vapeur d'eau qui, condensées dans l'atmosphère, en occupent les basses régions et en troublent la transparence.

Les brouillards se forment quand le sol humide est plus chaud que l'air. Les vapeurs qui montent alors se condensent et deviennent visibles. Toutefois, il faut que l'air atteigne son point de saturation (282), sinon la condensation n'a pas lieu. Les brouillards peuvent encore prendre naissance quand un courant d'air chaud et humide passe au-dessus d'une rivière dont la température est inférieure à la sienne, car l'air étant alors refroidi, aussitôt qu'il est saturé, il y a condensation des vapeurs.

739. **Nuages.** — Les *nuages* sont des amas de vapeurs condensées en gouttelettes d'une petitesse extrême, de même que les brouillards, dont ils ne diffèrent que parce qu'ils occupent les hautes régions de l'atmosphère; ils résultent toujours de la condensation des vapeurs qui s'élèvent de la terre. D'après les apparences qu'ils présentent, on divise les nuages en quatre espèces principales, qui sont les *cirrus*, les *cumulus*, les *stratus* et les *nimbus*. Ces quatre sortes de nuages sont représentées dans la figure 549, et désignées respectivement par quatre, trois, deux, ou un oiseau au vol.

Les *cirrus* sont de petits nuages blanchâtres, offrant l'aspect de filaments déliés assez semblables à de la laine cardée. Ce sont les nuages les plus élevés, et, vu la basse température des régions qu'ils occupent, on les regarde comme formés de particules glacées ou de flocons de neige. Leur apparition précède souvent un changement de temps.

Les *cumulus* sont des nuages arrondis, présentant l'aspect de montagnes entassées les unes sur les autres. Ils sont plus fréquents en été qu'en hiver, et après s'être formés le matin, ils se dissipent généralement le soir. Si, au contraire, ils deviennent alors plus

nombreux, et surtout s'ils sont surmontés de cirrus, on doit s'attendre à de la pluie ou à des orages.

Les *stratus* sont des couches nuageuses horizontales, très-larges et continues, qui se forment au coucher du soleil et disparaissent à son lever. Ils sont fréquents en automne et rares au printemps. Ils sont plus bas que les précédents.

Enfin, les *nimbus*, ou nuages de pluie, sont des nuages qui n'af-

Fig. 549.

fectent aucune forme caractéristique; ils se distinguent seulement par une teinte d'un gris uniforme et par des bords frangés.

La hauteur des nuages est très-variable; en moyenne, elle est de 1200 à 1400 mètres en hiver, et de 3000 à 4000 en été. Mais elle est souvent beaucoup plus grande : Gay-Lussac, dans son ascension aérostatique, à une hauteur de 7016 mètres au-dessus du niveau de la mer, observa au-dessus de lui des cirrus qui paraissaient être à une hauteur considérable. M. d'Abbadie a observé, en Éthiopie, des nuages orageux dont la hauteur n'était que de 212 mètres au-dessus du sol.

Pour expliquer la suspension des nuages dans l'atmosphère, Halley proposa, le premier, l'hypothèse des vapeurs vésiculaires, hy-

pothèse qui consiste à supposer que les nuages sont formés d'une infinité de vésicules extrêmement petites, creuses comme des bulles de savon, et remplies d'un air plus chaud que l'air ambiant par un effet d'absorption de la chaleur solaire; en sorte que ces vésicules flotteraient dans l'air comme autant de petits ballons. Cette théorie, soutenue par de Saussure, puis par Kratzenstein, par M. Bravais et par le plus grand nombre des physiciens, a été longtemps universellement enseignée; mais combattue d'abord par Desagulier, puis par Monge, elle compte aujourd'hui de nombreux contradicteurs. Ceux-ci admettent que les nuages et les brouillards sont formés de gouttelettes d'eau extrêmement petites, pleines et flottant dans l'atmosphère où elles sont soutenues par les courants d'air chaud ascendants, de même que les poussières légères sont élevées par les vents. Quant à l'immobilité que présentent ordinairement les nuages dans le sens de la verticale, elle ne serait qu'apparente selon ces physiciens. Le plus souvent, les nuages tombent lentement, mais alors leur partie inférieure se dissipe continuellement dans les couches plus chaudes qu'elle traverse, tandis que leur partie supérieure s'accroît sans cesse par l'addition de nouvelles vapeurs qui se condensent, ce qui explique comment les nuages nous paraissent conserver une hauteur constante.

740. **Pluie.** — La *pluie* est la chute, à l'état de gouttelettes, de l'eau provenant de la condensation, dans les hautes régions de l'atmosphère, des vapeurs qui s'élèvent du sol.

On mesure la quantité de pluie qui tombe annuellement dans un lieu au moyen d'un appareil qu'on nomme *pluviomètre* ou *udomètre*. C'est un vase cylindrique M (fig. 550 et 551), fermé à sa partie supérieure par un couvercle B, qui a la forme d'un entonnoir dans lequel tombe l'eau de pluie. Celle-ci pénètre ensuite dans l'intérieur du vase par un petit trou, de manière à être soustraite le plus possible à l'évaporation. De la base de l'appareil part un tube de verre A dans lequel l'eau s'élève à la même hauteur que dans l'intérieur du pluviomètre, hauteur qui se mesure au moyen d'une échelle graduée en millimètres, placée sur le côté du tube, comme le montre la figure 550. Cet appareil étant placé dans un lieu découvert, si, au bout d'un mois, par exemple, la hauteur de l'eau dans le tube est de 5 centimètres, cela indique que, dans le vase, l'eau a atteint cette hauteur, et, par conséquent, que, si l'eau tombée était étendue sur le sol, sans évaporation ni infiltration, il y en aurait une couche de 5 centimètres.

On a constaté, à l'Observatoire de Paris, que la quantité de pluie recueillie dans le pluviomètre est d'autant plus grande que cet instrument est moins élevé au-dessus du sol. La même remarque a été faite en Angleterre et en Amérique. On a d'abord expliqué ce phénomène en disant que les gouttes de pluie qui sont, en

Fig. 550.

Fig. 551.

général, plus froides que les couches d'air qu'elles traversent, condensent la vapeur contenue dans ces couches, et vont, par suite, en augmentant de volume, ce qui fait qu'il tombe plus de pluie à la surface du sol qu'à une certaine hauteur. Mais on a objecté à cette théorie que l'excès de la quantité d'eau qui tombe à la surface du sol sur celle qui tombe à une certaine hauteur, dépasse six ou sept fois celle qui pourrait résulter de la condensation, même pendant tout le trajet des gouttes de pluie des nuages jusqu'à la terre. On a donc attribué la différence dont il s'agit à une cause purement locale, et on admet aujourd'hui que cette différence est occasionnée par des remous qui se produisent dans l'air autour du pluviomètre, d'une manière d'autant plus sensible qu'il est plus élevé au-dessus du sol; ces remous ayant pour effet de disperser les gouttelettes qui tendent à tomber dans l'instrument, et diminuant ainsi la quantité d'eau qu'il reçoit.

Toutefois, il reste évident que si les gouttes de pluie traversent un air humide, elles peuvent, d'après leur température, condenser de la vapeur et augmenter de volume. Si, au contraire, elles traversent un air sec, les gouttelettes tendent à se vaporiser, et il tombe moins de pluie sur le sol qu'à une certaine hauteur; il peut même arriver ainsi que la pluie n'atteigne pas la terre.

Un grand nombre de circonstances locales peuvent faire varier la quantité d'eau qui tombe dans divers pays, mais, toutes choses

égales d'ailleurs, c'est dans les pays chauds qu'il doit pleuvoir davantage, car la vaporisation y est plus abondante. On observe, en effet, que la quantité de pluie décroît de l'équateur aux pôles. A Paris, la hauteur d'eau qui tombe annuellement est de $0^m,564$; à Bordeaux, de $0^m,650$; à Madère, de $0^m,767$; à la Havane, de $2^m,32$; à Saint-Domingue, de $2^m,73$.

La quantité de pluie varie avec les saisons. A Paris, l'hiver, la hauteur d'eau qui tombe est de $0^m,107$; le printemps, de $0^m,174$; l'été, de $0^m,164$; l'automne, de $0^m,122$. C'est donc l'hiver qu'il tombe le moins d'eau.

741. **Rosée, serein, gelée blanche.** — La *rosée* n'est autre chose que de la vapeur qui se condense et se dépose en gouttelettes sur les corps pendant la nuit. Ce phénomène est dû au refroidissement qu'éprouvent par l'effet du rayonnement nocturne (394) les corps placés à la surface du sol. Leur température s'abaissant alors de plusieurs degrés au-dessous de celle de l'air, il arrive, surtout dans les saisons chaudes, que cette température devient inférieure à celle à laquelle l'atmosphère serait saturée. C'est alors que les couches d'air en contact avec les corps, et sensiblement à la même température qu'eux, laissent déposer une partie de la vapeur qu'elles contiennent; phénomène analogue à celui qui se produit quand, dans une pièce chaude et humide, on apporte une carafe pleine d'eau fraîche : les vapeurs de l'air se condensent sur ses parois.

D'après cette théorie, due à l'Anglais Wells, toutes les causes qui favorisent le refroidissement des corps augmentent la quantité de rosée. Ces causes sont : le pouvoir émissif des corps, l'état du ciel et l'agitation de l'air. Les corps qui ont un grand pouvoir émissif (352), se refroidissant davantage, doivent condenser plus de vapeur. En effet, le dépôt de rosée est généralement nul sur les métaux, dont le pouvoir émissif est faible, surtout s'ils sont polis; tandis que la terre, le sable, le verre, les plantes, qui ont un grand pouvoir émissif, se recouvrent abondamment de rosée.

L'état du ciel a aussi une grande influence sur la rosée. Si le ciel est sans nuage, les espaces planétaires, qui sont à une très-basse température, n'envoient vers la terre qu'une quantité de chaleur inappréciable, et le sol se refroidissant alors rapidement par le rayonnement nocturne, il y a un abondant dépôt de rosée. Mais s'il y a des nuages, ceux-ci, dont la température est beaucoup moins basse que celle des espaces planétaires, rayonnent vers le sol, et par suite les corps à la surface de la terre n'éprouvant

plus qu'un faible refroidissement, le dépôt de rosée n'a pas lieu.

Le vent a aussi une influence sur la quantité de vapeur qui se dépose. S'il est faible, il l'augmente en renouvelant l'air; mais s'il est fort, il la diminue en échauffant les corps par son contact, et en ne laissant pas à l'air le temps de se refroidir. Enfin, le dépôt de rosée est d'autant plus abondant que l'air est plus humide, car il est plus près de son point de saturation.

Le *serein* est une précipitation d'eau sous forme d'une pluie très-fine, sans qu'il y ait apparence de nuage. Ce phénomène se produit pendant les grandes chaleurs, dans les contrées humides, au coucher du soleil, quand les couches inférieures de l'air se refroidissent au-dessous de leur point de saturation.

La *gelée blanche* et le *givre* résultent, comme la rosée, des vapeurs contenues dans l'atmosphère, lorsque ces vapeurs se condensent sur des corps à une température au-dessous de zéro. La forme floconneuse que présentent les petits cristaux dont le givre est formé, fait voir qu'ici les vapeurs se congèlent immédiatement sans passer par l'état liquide. Le givre se dépose, de même que la rosée, sur les corps qui rayonnent davantage, tels que les tiges et les feuilles des végétaux, et le dépôt se fait principalement sur les parties tournées vers le ciel.

742. Neige, grésil, verglas. — La *neige* est de l'eau solidifiée en petits cristaux étoilés, diversement ramifiés et flottant dans l'atmosphère. Ces cristaux proviennent de la congélation des gouttelettes qui forment les nuages, lorsque la température de ces derniers descend au-dessous de zéro. Ils sont d'autant plus réguliers qu'ils se sont formés dans un air plus calme. Pour les observer, on les reçoit sur un corps noir et on les regarde avec une forte loupe. La régularité et, en même temps, la variété de leurs formes, sont vraiment admirables. La figure 552 fait voir quelques-unes des formes que présentent les cristaux de neige, quand on les observe au microscope. Leurs variétés paraissent être de plusieurs centaines.

Il neige d'autant plus dans un lieu qu'il est plus voisin des pôles ou plus élevé au-dessus du niveau des mers. Vers les pôles, la terre est constamment couverte de neige; il en est de même sur les hautes montagnes, où règnent des neiges perpétuelles, même dans les régions équatoriales.

Le *grésil*, qui est aussi de l'eau solidifiée, est formé de petites aiguilles de glace pressées les unes contre les autres d'une manière confuse. On attribue sa formation à la congélation brusque des gouttelettes des nuages dans un air agité.

Le *verglas* est une couche de glace unie et transparente qui se forme, sur le sol, à la surface des corps. La condition nécessaire pour sa formation est que la température du sol étant au-dessous de zéro, après quelques jours d'un froid continu, il vienne à tomber un peu de pluie; celle-ci se congèle aussitôt; mais s'il en tombe une plus grande quantité, le sol s'échauffe et le verglas ne se forme pas.

743. **Grêle.** — La *grêle* est un amas de globules de glace compactes, plus ou moins volumineux, qui tombent de l'atmosphère.

Fig. 552.

Dans nos climats, la grêle tombe principalement pendant le printemps et l'été, et aux heures les plus chaudes de la journée; il en tombe rarement la nuit. La chute de la grêle est toujours précédée d'un bruissement particulier.

La grêle est généralement le précurseur des orages; il est rare qu'elle les accompagne, plus rare qu'elle les suive. La grosseur des grêlons est très-variable : elle atteint fréquemment celle d'une noisette. On en a observé de la grosseur d'un œuf de pigeon, du poids de 200 à 300 grammes. Aucune théorie n'explique d'une manière satisfaisante la formation des grêlons, et surtout comment ils peuvent atteindre un tel poids avant de tomber. Dans la théorie de Volta (594), les grêlons sont successivement attirés par deux nuages chargés d'électricités contraires; mais si les grêlons étaient ainsi attirés, à plus forte raison les deux nuages le seraient l'un par l'autre, et se confondraient.

Météores lumineux.

744. **Électricité atmosphérique; expérience de Franklin.** — Les phénomènes lumineux les plus fréquents et les plus remarquables par leurs effets sont ceux produits par l'électricité libre qui se rencontre dans l'atmosphère. Les premiers physiciens qui observèrent l'étincelle électrique la comparèrent aussitôt à la lueur de l'éclair, et le petillement qu'elle fait entendre, au bruit du tonnerre. Mais c'est Franklin qui, le premier, à l'aide des batteries électriques, put établir un parallèle complet entre la foudre et l'électricité, et indiquer, dans un Mémoire publié en 1749, les expériences à faire pour soutirer aux nuages orageux leur électricite au moyen de pointes métalliques. Guidé par les idées théoriques de Franklin, Dalibard, physicien français, dressa dans un jardin. à Marly, près Paris, une barre de fer isolée, de 33 mètres de hauteur, laquelle, sous l'influence d'un nuage orageux, donna, le 10 mai 1752, des étincelles assez fortes pour charger plusieurs bouteilles de Leyde. Cependant, Franklin, de son côté, se disposait à faire l'expérience qu'il avait annoncée; il attendait pour cela qu'un clocher qui était en construction fût terminé, lorsqu'il eut la pensée de faire usage d'un cerf-volant, muni d'une pointe métallique, qui pouvait atteindre à de plus hautes régions dans l'atmosphère. En juin 1752, par un temps d'orage, et avant de connaître l'expérience de Dalibard, il se rendit donc dans un champ, près de Philadelphie, en compagnie de son jeune fils. Là, ayant lancé le cerf-volant, il attacha une clef à la corde et à la clef un cordon de soie destiné à isoler l'appareil; puis il fixa le cordon de soie à un arbre. Ayant présenté la main à la clef, il ne recueillit d'abord aucune étincelle, et commençait à désespérer du succès, quand une légère pluie étant survenue, la corde devint bon conducteur, et la clef donna l'étincelle désirée. L'émotion du célèbre physicien fut si vive, ainsi qu'il le raconte lui-même dans ses lettres, qu'il ne put retenir ses larmes.

Franklin, qui avait découvert le pouvoir des pointes (576), mais qui en ignorait la théorie, admettait que le cerf-volant soutirait au nuage son électricité; or, d'après la théorie de l'électrisation par influence (580), le phénomène doit s'expliquer par l'influence que le nuage orageux exerçait sur le cerf-volant et sur la corde.

745. **Appareils pour apprécier l'électricité de l'atmosphère.** — Les appareils dont on a fait usage pour reconnaître la présence

de l'électricité dans l'atmosphère sont : l'électromètre à boules de sureau, à pailles ou à feuilles d'or, l'appareil de Dalibard, des flèches lancées dans l'atmosphère, et même des cerfs-volants ou des ballons captifs.

Pour observer l'électricité pendant un temps serein, où la tension est généralemet faible, on emploie de préférence l'électromètre que Saussure avait appliqué à ce genre de recherches. C'est un électromètre semblable à celui déjà décrit (584), mais dont la tige qui porte les feuilles d'or ou les pailles est surmontée d'un conducteur de 6 décimètres de hauteur, terminé en boule ou en pointe (fig. 553). Pour préserver l'appareil de la pluie, on le couvre d'un chapeau métallique d'un décimètre de diamètre. La cage de verre, qui est carrée, au lieu d'être ronde, n'a que 5 centimètres de côté, et un cadran divisé, appliqué sur sa face antérieure, indique l'angle d'écart des feuilles d'or ou des pailles. Cet électromètre ne donne des signes d'électricité atmosphérique qu'autant qu'on l'élève dans l'atmosphère, de façon qu'il se trouve dans des couches d'air dont l'état électrique soit supérieur au sien. Une élévation de 3 décimètres suffit pour obtenir une divergence de 20 degrés par suite de l'excès d'électricité.

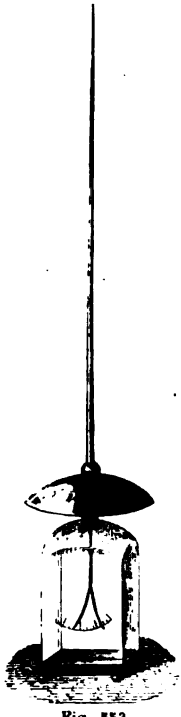


Fig. 553.

Saussure s'est aussi servi, pour reconnaître l'électricité de l'atmosphère, d'une boule de cuivre qu'il lançait verticalement avec la main. Cette boule était fixée à l'extrémité d'un fil métallique dont l'autre bout était lié à un anneau qui pouvait glisser le long du conducteur de l'électromètre. D'après l'écart des pailles ou des feuilles d'or, on estimait l'état électrique de l'air à la hauteur où était parvenue la boule. M. Becquerel, dans des expériences faites sur le mont Saint-Bernard, a perfectionné l'appareil de Saussure en remplaçant la boule par une flèche qu'on lançait dans l'atmosphère avec un arc fortement tendu. Un fil de soie recouvert de clinquant, de 80 mètres de longueur, était fixé d'un bout à la flèche, et communiquait de

l'autre avec la tige d'un électromètre à pailles ou à feuilles d'or.

Peltier a fait usage d'un électromètre à feuilles d'or portant à la partie supérieure un globe de cuivre un peu gros. Avec cet instrument, l'observateur se place dans un endroit qui domine les lieux environnants, et il suffit alors d'élever l'électromètre d'une faible hauteur, même de quelques décimètres, pour lui voir donner des signes d'électricité.

Quand on veut observer l'électricité des nuages, comme la tension électrique est alors très-considérable, on fait usage d'une longue barre métallique terminée en pointe, comme celle qu'avait adoptée Dalibard dans l'expérience décrite ci-dessus. Cette barre, qui est isolée avec soin, est fixée au faîte d'un édifice, et sa partie inférieure est mise en communication avec un électromètre ou même avec un carillon électrique (fig. 410, page 561), qui annonce la présence des nuages orageux. Toutefois, la barre pouvant donner alors des étincelles redoutables, on doit placer auprès une boule métallique dont la communication avec le sol soit bien établie et qui soit plus rapprochée de la barre que l'expérimentateur lui-même, afin que si l'intincelle éclate, ce soit la boule qui soit frappée et non l'observateur. Richmann, professeur à Saint-Pétersbourg, fut tué dans une expérience de ce genre par une étincelle qui le frappa au front.

Enfin, on a encore fait usage de cerfs-volants munis d'une pointe comme dans l'expérience de Franklin, et communiquant, au moyen d'une corde recouverte de clinquant, avec un électromètre. On a employé aussi des ballons retenus captifs par des cordes métalliques.

746. **Électricité habituelle de l'atmosphère.** — Au moyen des divers appareils qui viennent d'être décrits, on a constaté que ce n'est pas seulement pendant les temps d'orage que l'atmosphère possède de l'électricité, mais qu'elle contient toujours de l'électricité libre, tantôt positive, tantôt négative. Quand le ciel est pur et sans nuages, c'est constamment de l'électricité positive qu'on observe dans l'atmosphère; mais cette électricité varie en intensité avec la hauteur des lieux et avec les heures de la journée. C'est dans les lieux les plus élevés et les plus isolés qu'on observe le maximum d'intensité. Dans les maisons, dans les rues, sous les arbres, on ne remarque aucune trace d'électricité positive. Dans les villes, l'électricité positive n'est sensible que sur les grandes places, sur les quais des rivières et sur les ponts. Dans tous les cas, on n'observe d'électricité positive qu'à une certaine hauteur au-dessus

du sol. En rase campagne, elle ne devient sensible qu'à 1m,30 de hauteur; au delà, elle augmente suivant une loi qui n'est pas connue et qui dépend de l'état hygrométrique de l'air.

Au lever du soleil, l'excès d'électricité positive de l'atmosphère est faible. Il augmente jusque vers 8 ou 11 heures, suivant les saisons, et atteint alors un premier maximum. Il décroît ensuite rapidement jusqu'un peu avant le coucher du soleil, et augmente de nouveau pour atteindre un second maximum peu d'heures après son coucher; le reste de la nuit, l'électricité décroît. Ces périodes croissantes et décroissantes, qui s'observent toute l'année, sont d'autant plus sensibles que le ciel est plus serein et le temps plus calme. Enfin, l'électricité positive des temps sereins est beaucoup plus forte en hiver qu'en été.

Quand le ciel est couvert, c'est tantôt de l'électricité positive, tantôt de l'électricité négative qu'on observe dans l'atmosphère. Il arrive même souvent que l'électricité change de signe plusieurs fois dans une journée par le passage d'un nuage électrisé. Pendant les orages, et lorsqu'il pleut ou qu'il neige, l'atmosphère est électrisée positivement un jour, négativement un autre, et les deux nombres de jours sont sensiblement égaux. La tension électrique peut devenir assez intense pour rendre la pluie étincelante, phénomène dont on a observé plusieurs exemples.

Quant à l'électricité du sol, Peltier a trouvé, à l'aide du multiplicateur, qu'elle est constamment négative, mais à des degrés différents, suivant l'état hygrométrique et la température de l'air.

747. **Causes de l'électricité de l'atmosphère.** — On a cherché à expliquer par différentes hypothèses l'origine de l'électricité atmosphérique. Les uns l'ont attribuée au frottement de l'air contre le sol, d'autres à la végétation des plantes, à l'évaporation de l'eau. Quelques-uns ont aussi comparé la terre à une vaste pile voltaïque, d'autres à un appareil thermo-électrique (707). Plusieurs de ces causes peuvent, en effet, concourir au phénomène.

Volta fit voir, le premier, que l'évaporation de l'eau produit de l'électricité. Depuis, M. Pouillet a trouvé que, si l'eau est distillée, l'évaporation ne donne jamais lieu à un dégagement d'électricité; mais si l'eau tient en dissolution un alcali ou un sel, même en petite quantité, la vapeur est électrisée positivement et la dissolution négativement. Si l'eau est combinée à un acide, c'est l'inverse qui a lieu. On a admis dès lors que les eaux qui se trouvent à la surface du sol et dans les mers, contenant toujours en dissolution des

matières salines, les vapeurs qui s'en dégagent doivent être électrisées positivement et le sol négativement.

Pour constater le développement de l'électricité par l'évaporation, on chauffe fortement une capsule de platine, on y verse une petite quantité de liquide, et on la pose sur le plateau supérieur de l'électromètre condensateur (fig. 426, page 576), en ayant soin de faire communiquer le plateau inférieur avec le sol. L'eau de la capsule étant évaporée, on rompt la communication avec le sol, et on enlève le plateau supérieur. Les feuilles d'or divergent alors, si l'eau tenait en dissolution quelques substances étrangères, mais restent en repos si elle était distillée.

Se fondant sur cette expérience, M. Pouillet a attribué le développement de l'électricité par l'évaporation à la séparation des particules d'eau d'avec les substances dissoutes; mais M. Reich et M. Riess, en Allemagne, ont montré que l'électricité dégagée pendant l'évaporation peut être attribuée au frottement exercé par les particules d'eau qu'entraîne la vapeur contre les parois du vase, de la même manière que dans la machine d'Armstrong (592). Par suite d'expériences récentes, M. Gaugain vient d'arriver au même résultat, et il en conclut qu'on n'est plus en droit d'attribuer l'électricité de l'atmosphère aux ségrégations chimiques qui s'opèrent pendant l'évaporation tranquille de l'eau des mers.

Quant à l'hypothèse qui consiste à considérer la terre comme une immense source d'électricité voltaïque due à des actions chimiques, M. Becquerel a fait connaître récemment des expériences nombreuses d'où il découle qu'au contact des terres et des eaux il y a toujours production d'électricité : la terre prenant un excès notable d'électricité positive ou négative, et l'eau un excès correspondant d'électricité contraire, selon la nature des sels ou autres composés tenus en dissolution dans les eaux. C'est là un fait général qui, d'après les travaux de M. Becquerel, ne souffre pas d'exception.

M. Becquerel expérimentait avec un multiplicateur ordinaire dont le fil était mis en communication avec deux lames de platine plongeant dans les terrains ou les eaux dont il voulait connaître l'état électrique. C'est ainsi qu'il a constaté que lorsque deux terrains humides sont en contact, celui qui renferme la solution la plus concentrée prend un excès d'électricité positive. Il a trouvé de la même manière que dans le voisinage d'une rivière, même à une distance assez éloignée, la terre et les objets placés à sa surface possédaient un excès d'électricité négative, tandis que l'eau et les plantes aquatiques qui surnageaient à sa surface étaient chargées

d'électricité positive. Mais suivant la nature des substances en dissolution dans les eaux, il peut se produire des effets inverses.

D'après les expériences de M. Becquerel, les eaux étant tantôt dans un état positif, tantôt dans un état négatif, et les terres dans un état contraire, il en résulte que l'eau, en se vaporisant, doit constamment verser dans l'atmosphère un excès d'électricité positive ou négative, tandis que la terre, par les vapeurs qui se dégagent à sa surface, laisse échapper un excès d'électricité contraire. Or, ces excès d'électricité doivent nécessairement intervenir sur la distribution de l'électricité répandue dans l'atmosphère, et peuvent servir à expliquer comment les nuages sont électrisés tantôt positivement, tantôt négativement (748).

748. **Électricité des nuages.** — En général, les nuages sont tous électrisés, tantôt positivement, tantôt négativement, et ne diffèrent entre eux que par une tension électrique plus ou moins forte. On explique ordinairement la formation des nuages positifs, par les vapeurs qui se dégagent du sol et vont se condenser dans les hautes régions de l'atmosphère pour former les nuages. Quant aux nuages négatifs, on admet, en général, qu'ils résultent de brouillards qui, par leur contact avec le sol, se sont chargés de fluide négatif qu'ils conservent ensuite lorsqu'ils s'élèvent dans l'atmosphère; ou bien que, séparés du sol par des couches d'air chargées d'humidité, ils ont été électrisés négativement par l'influence de nuages positifs qui ont repoussé dans le sol l'électricité positive. Mais les expériences ci-dessus (747) de M. Becquerel suffisent pour donner l'explication des deux états électriques que peuvent présenter les nuages.

749. **Éclair.** — L'*éclair* est une lumière éblouissante projetée par l'étincelle électrique qui éclate des nuages chargés d'électricité. La lumière des éclairs est blanche dans les basses régions de l'atmosphère, mais dans les hautes régions, où l'air est plus raréfié, elle prend une teinte violacée, comme le fait, en pareil cas, l'étincelle de la machine électrique (608).

Les éclairs ont quelquefois plusieurs lieues de longueur. Leur passage dans l'air s'opère le plus souvent en zigzag. On attribue ce phénomène à la résistance que présente l'air comprimé par le passage d'une forte décharge. L'étincelle se dévie alors de la ligne droite pour prendre la direction suivant laquelle la résistance est moindre. Dans le vide, en effet, la transmission électrique se fait en ligne droite.

On peut distinguer quatre sortes d'éclairs : 1° Les éclairs en zig-

zag, qui se meuvent avec une vitesse extrême, sous la forme d'un trait de feu à contours parfaitement déterminés, et qui sont tout à fait comparables à l'étincelle des machines électriques. 2° Les éclairs qui, au lieu d'être linéaires comme les précédents, embrassent tout l'horizon, sans présenter aucun contour apparent, comme le ferait l'éclat subit d'une explosion de matières inflammables. Ces éclairs, qui sont les plus fréquents, paraissent se produire au sein même de la nue et en éclairer la masse. 3° Les éclairs dits *de chaleur*, parce qu'ils brillent dans les nuits d'été sans qu'on aperçoive aucun nuage au-dessus de l'horizon, et sans qu'on entende aucun bruit. De nombreuses hypothèses ont été proposées pour expliquer l'origine de ces éclairs. La plus probable, c'est qu'ils ne sont que des éclairs ordinaires qui éclatent dans des nues situées au-dessous de l'horizon, à des distances telles que le roulement du tonnerre ne peut arriver jusqu'à l'oreille de l'oservateur. 4° Les éclairs qui apparaissent sous la forme de globes de feu. Ces éclairs, qui sont quelquefois visibles pendant plus de dix secondes, descendent des nuages sur la terre avec assez de lenteur pour que l'œil puisse les suivre. Ces globes rebondissent souvent à la surface du sol; d'autres fois ils se divisent et éclatent avec un bruit comparable à la détonation de plusieurs pièces de canon. On a remarqué que c'est, en général, sous cette forme que se présente la foudre, lorsqu'elle pénètre dans l'intérieur des édifices. L'origine de ces éclairs n'est pas connue.

La durée des éclairs des trois premières espèces n'est pas d'un millième de seconde, ce qui a été constaté par M. Wheatstone, au moyen d'une roue qu'on fait tourner assez vite pour que les rayons en soient invisibles; mais en les éclairant avec la lumière d'un éclair, la durée de celui-ci est si courte que, quelle que soit la vitesse de rotation de la roue, elle apparaît complétement immobile, c'est-à-dire que son déplacement n'est pas sensible pendant la durée de l'éclair.

750. **Bruit du tonnerre.** — Le *tonnerre* est la détonation violente qui succède à l'éclair dans les nuées orageuses. L'éclair et la détonation sont toujours simultanés; mais on observe un intervalle de plusieurs secondes entre ces deux phénomènes, ce qui provient de ce que le son ne parcourt qu'environ 337 mètres par seconde (192), tandis que la lumière n'emploie qu'un intervalle inappréciable pour se propager de la nue à l'œil de l'observateur (401). Par conséquent, celui-ci n'entend le bruit du tonnerre que cinq ou dix secondes, par exemple, après l'éclair, suivant qu'il est distant du nuage orageux de cinq ou dix fois 337 mètres.

Le bruit du tonnerre résulte de l'ébranlement qu'excite, dans la nue et dans l'air, la décharge électrique, ébranlement que rend sensible l'expérience du thermomètre de Kinnersley (611). Près du lieu où jaillit l'éclair, le bruit du tonnerre est sec et de courte durée. Plus loin, on entend une série de bruits qui se succèdent rapidement. A une plus grande distance encore, le bruit, faible au commencement, se change en un roulement prolongé, d'intensité très-inégale. On a proposé de nombreuses hypothèses pour expliquer le roulement du tonnerre, mais aucune ne satisfait complétement. Les uns l'ont attribué à la réflexion du son sur la terre et sur les nuages; d'autres ont considéré l'éclair, non pas comme une seule étincelle électrique, mais comme une suite d'étincelles élémentaires qui donnent lieu chacune à une détonation particulière. Or, ces détonations partielles partant de points diversement éloignés et de zones d'inégale densité, il en résulte que non-seulement elles arrivent à l'oreille de l'observateur successivement, mais qu'elles y apportent des sons d'inégale intensité, ce qui occasionne la durée et l'inégalité du roulement. Enfin, on a attribué ce phénomène aux zigzags même de l'éclair, en admettant qu'il y a un maximum de compression de l'air à chaque angle saillant, ce qui produirait l'inégale intensité du son.

751. **Effets de la foudre.** — La *foudre* est la décharge électrique qui s'opère entre un nuage orageux et le sol. Celui-ci, sous l'influence de l'électricité du nuage, se charge d'électricité contraire, et lorsque l'effort que font les deux électricités pour se réunir l'emporte sur la résistance de l'air, l'étincelle éclate, ce qu'on exprime en disant que la foudre *tombe*. L'éclair éclate, en général, de haut en bas; mais on observe aussi des phénomènes de *foudres ascendantes*; ce qui se produit probablement lorsque les nuages, étant électrisés négativement, la terre l'est positivement; car toutes les expériences montrent qu'à la pression ordinaire, le fluide positif traverse plus facilement l'atmosphère que le fluide négatif.

D'après la première loi des attractions électriques (572), la foudre doit tomber sur les objets les plus rapprochés de la nue et les meilleurs conducteurs. On observe en effet, que ce sont les arbres, les édifices élevés, les métaux, qui sont plus particulièrement frappés de la foudre. C'est pourquoi il est imprudent de se placer sous les arbres, en temps d'orage, surtout si ces arbres sont bons conducteurs, comme les chênes, les ormes. Mais le danger n'est plus le même sous les arbres résineux, comme les pins, parce qu'ils conduisent mal l'électricité.

Les effets de la foudre sont très-variés et de même nature que ceux des batteries (607), mais avec une intensité bien plus énergique. La foudre tue les hommes et les animaux, enflamme les matières combustibles, fond les métaux, brise en éclats les corps peu conducteurs. En pénétrant dans le sol, elle fond les matières siliceuses qui se trouvent sur son passage, et il se produit ainsi, dans la direction de la décharge, des tubes vitrifiés qu'on a nommés *tubes fulminaires* ou *fulgurites*, et qui ont jusqu'à dix mètres de long. Enfin, en tombant sur les barres de fer, elle les aimante, et renverse souvent les pôles des aiguilles des boussoles.

La foudre répand, en général, sur son passage, une odeur qu'on a comparée à celle du soufre enflammé ou d'une matière phosphoreuse. Cette odeur a d'abord été attribuée à un composé oxygéné formé sous l'influence de la décharge électrique, auquel on a donné le nom d'*ozone;* mais M. Schœnbein, en 1840, puis MM. Marignac et de La Rive, et enfin MM. Ed. Becquerel et Frémy, ont démontré que l'ozone n'est autre chose que de l'oxygène électrisé.

752. **Choc en retour.** — Le *choc en retour* est une commotion violente et même mortelle que ressentent parfois les hommes et les animaux à une assez grande distance du lieu où la foudre éclate. Ce phénomène a pour cause l'action par influence que le nuage orageux exerce sur tous les corps placés dans sa sphère d'activité. Ces corps se trouvent alors, ainsi que le sol, chargés l'électricité contraire à celle du nuage : mais si celui-ci se décharge par la recomposition de son électricité avec celle du sol, immédiatement l'influence cesse, et les corps revenant brusquement de l'état électrique à l'état neutre, il en résulte la secousse qui caractérise le choc en retour. On rend ce phénomène sensible en plaçant une grenouille dans le voisinage d'une forte machine électrique : à chaque étincelle qu'on tire de celle-ci, la grenouille éprouve une secousse brusque.

753. **Paratonnerre.** — Un *paratonnerre* est une tige de fer destinée à présenter un écoulement facile à l'électricité du sol, attirée par l'électricité contraire des nuages orageux. L'invention des paratonnerres est due à Franklin, en 1755.

On distingue, dans un paratonnerre, deux parties : la tige et le conducteur. La *tige* est une barre de fer rectiligne, terminée en pointe, qu'on fixe verticalement au faîte des édifices qu'il s'agit de préserver; elle a de six à neuf mètres de hauteur, et sa section, à la base, est un carré de cinq à six centimètres de côté. Le *conducteur* est une barre de fer qui descend du pied de la tige jusqu'au

sol dans lequel elle pénètre profondément. Des barres de fer ne pouvant facilement, à cause de leur rigidité, suivre les contours des édifices, il est préférable de former le conducteur de cordes de fil de fer comme celles qu'on emploie dans les ponts suspendus. L'Académie des sciences a publié récemment un rapport sur les paratonnerres, dans lequel elle recommande d'employer plutôt des fils de cuivre rouge que des fils de fer dans la fabrication des cordes métalliques destinées à servir de conducteur, le cuivre rouge conduisant beaucoup mieux l'électricité que le fer. Ces cordes doivent avoir, dit le rapport, un centimètre carré de section métallique, les fils de 1 à 1,5 millimètre de diamètre, et peuvent être cordées à trois torons, comme les cordes ordinaires. Le même rapport conseille de terminer la tige des paratonnerres par une pointe de cuivre rouge plutôt que par une pointe de platine, toujours à cause de la plus grande conductibilité.

Le conducteur se rend ordinairement dans un puits, et, pour mieux établir la communication avec le sol, on le termine par deux ou trois ramifications. Si l'on n'a pas de puits à proximité, on pratique, dans le sol, un trou de quatre à six mètres de profondeur, et après y avoir introduit le pied du conducteur, on achève de remplir le trou avec de la braise de boulanger, qui conduit bien.

La théorie des paratonnerres repose sur l'électrisation par influence et sur le pouvoir des pointes (576). Franklin, qui, aussitôt qu'il eut constaté l'identité de la foudre et de l'électricité, songea à appliquer le pouvoir des pointes aux paratonnerres, admettait que ceux-ci soutirent aux nuages orageux leur électricité ; c'est le contraire qui a lieu. Lorsqu'un nuage orageux, électrisé positivement, par exemple, s'élève dans l'atmosphère, il agit par influence sur la terre, repousse au loin le fluide positif et attire le fluide négatif, qui s'accumule sur les corps placés à la surface du sol, d'autant plus abondamment que ces corps atteignent une plus grande hauteur. Les plus hauts sont alors ceux qui possèdent la plus forte tension, et qui, par conséquent, sont les plus exposés à la décharge électrique; mais si ces corps sont armés de pointes métalliques comme les tiges des paratonnerres, le fluide négatif, attiré du sol par l'influence du nuage, s'écoule dans l'atmosphère et va neutraliser le fluide positif de la nue. Par conséquent, non-seulement un paratonnerre s'oppose à l'accumulation de l'électricité à la surface de la terre, mais encore il tend à ramener les nuées orageuses à l'état naturel, double effet qui a pour but de prévenir

de la foudre. Cependant, le dégagement d'électricité est
'ois si abondant, que le paratonnerre est insuffisant pour
ɔr le sol et que la foudre éclate; mais c'est alors le para-
qui reçoit la décharge, en raison de sa plus grande con-
té, et l'édifice est préservé.
ɔrience a appris qu'une tige de paratonnerre protége effi-
t autour d'elle un espace circulaire d'un rayon double
ıuteur. Par conséquent, un bâtiment de 64 mètres de
: serait préservé par deux tiges de 8 mètres, distantes de
ɔs.
ratonnerre, pour être efficace, doit satisfaire aux condi-
vantes : 1° la tige doit être assez grosse pour ne pas être
ıi la foudre tombe dessus; 2° elle doit se terminer en
ɔour donner plus facilement issue à l'électricité qui se
lu sol : c'est pour satisfaire à cette condition qu'on ter-
linairement la tige par une pointe de platine ou de cuivre
ɔoré, afin d'éviter l'oxydation; 3° le conducteur ne doit
r aucune solution de continuité depuis la tige jusqu'au sol;
nmunication entre la tige et le sol doit être la plus intime
; 5° si le bâtiment qu'on arme d'un paratonnerre renferme
es métalliques d'une certaine étendue, comme une cou-
de zinc, des gouttières de métal, des charpentes de fer,
les faire communiquer avec le conducteur du paraton-

trois dernières conditions ne sont pas remplies, on est
ıux *décharges latérales*, c'est-à-dire que l'étincelle peut
ɔntre le conducteur et l'édifice, et alors le paratonnerre ne
ıccroître le danger.
plus de détails sur les paratonnerres, nous renvoyons le
ı une *Instruction sur les paratonnerres*, publiée par Gay-
en 1823, laquelle vient d'être réimprimée et augmentée
ɔplément rédigé par une commission de l'Académie des
, à l'occasion des grandes quantités de fer qui entrent dans
tructions nouvelles.
. **Arc-en-ciel.** — L'*arc-en-ciel* est un météore lumineux
ıraît dans les nues opposées au soleil quand elles se ré-
ɔn pluie; il est formé de sept arcs concentriques présen-
cessivement les couleurs du spectre solaire. Quelquefois
ɔrve qu'un seul arc-en-ciel; mais le plus souvent on en
x : l'un, intérieur, dont les couleurs sont plus vives;
xtérieur, qui est plus pâle et dans lequel l'ordre des cou-

leurs est renversé. Dans l'arc intérieur, c'est le rouge qui est le plus élevé; dans l'autre arc, c'est le violet. Rarement on aperçoit trois arcs-en-ciel; la théorie indique qu'il peut en exister un plus grand nombre, mais leurs couleurs sont si faibles qu'elles échappent à la vue.

C'est la décomposition de la lumière blanche du soleil au moment où elle pénètre dans les gouttes de pluie, et sa réflexion sur leur face interne, qui produisent le phénomène de l'arc-en-ciel.

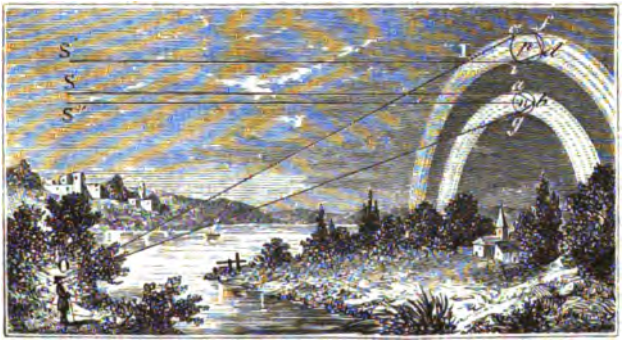


Fig. 554.

Ce phénomène s'observe, en effet, dans les gouttes de rosée, dans les jets d'eau, partout, en un mot, où la lumière solaire pénètre dans des gouttes d'eau, sous un certain angle (451).

L'apparition de l'arc-en-ciel et son étendue dépendent de la position de l'observateur et de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon; d'où l'on doit conclure que tous les rayons réfractés par les gouttes de pluie et réfléchis sur leur concavité vers l'œil du spectateur, ne sont pas propres à produire le phénomène. Ceux qui peuvent lui donner naissance ont reçu le nom de *rayons efficaces*.

Pour se rendre compte de cette efficacité, soit une goutte d'eau *n*, (fig. 554) dans laquelle pénètre un rayon solaire S*a*. Au point d'incidence *a*, une partie de la lumière se réfléchit sur la surface du liquide, l'autre y pénètre en se décomposant et traverse le globule suivant la direction *ab*. Arrivée en *b*, une portion de la lumière émerge hors de la goutte de pluie; l'autre portion se réfléchit sur la surface concave et vient pour émerger en *g*. En ce point, la lumière est encore réfléchie partiellement, le reste émerge dans une direction *g*O, qui forme, avec le rayon incident S*a*, un angle

qu'on nomme *angle de déviation*. Ce sont les rayons tels que *g*O. sortis du côté de l'observateur, qui déterminent, sur la rétine, la sensation des couleurs, à la condition, toutefois, que la lumière soit suffisamment intense.

Or, le calcul fait voir que pour une suite de rayons parallèles, qui tombent sur une même goutte et qui ne subissent qu'une réflexion dans son intérieur, l'angle de déviation augmente successivement depuis le rayon S''*n*, pour lequel il est nul, jusqu'à une certaine limite au delà de laquelle il décroît, et que près de cette limite les rayons entrés parallèlement à eux-mêmes dans une goutte de pluie, en sortent encore parallèles entre eux. De ce parallélisme, il résulte un faisceau de lumière qui possède assez d'intensité pour impressionner la rétine; ce sont donc les rayons qui sortent parallèles entre eux qui sont efficaces.

Les diverses couleurs qui composent la lumière blanche étant inégalement réfrangibles, le maximum de l'angle de déviation n'est pas le même pour toutes. Le calcul apprend que, pour les rayons rouges, la valeur de l'angle de déviation correspondant aux rayons efficaces est de 42° 2', et pour les rayons violets de 40° 17'. Il suit de là que pour toutes les gouttes placées de manière que les rayons qui vont du soleil à la goutte fassent avec ceux qui vont de la goutte à l'œil, un angle de 42° 2', cet organe reçoit la sensation de la couleur rouge; ce qui a évidemment lieu pour toutes les gouttes situées sur la circonférence de la base d'un cône dont le sommet coïncide avec l'œil de l'observateur, ce cône ayant son axe parallèle aux rayons solaires, et l'angle formé par deux génératrices opposées étant de 84° 4'. Telle est la formation de la bande rouge de l'arc-en-ciel. Pour la bande violette, l'angle du cône est de 80° 34'.

Les cônes correspondants à chaque bande ont le même axe, qu'on nomme *axe de vision*. Cette droite étant parallèle aux rayons du soleil, il s'ensuit que lorsque cet astre est à l'horizon, l'axe de vision est lui-même horizontal et l'arc-en-ciel apparaît sous la forme d'une demi-circonférence. Si le soleil s'élève, l'axe de vision s'abaisse, et avec lui l'arc-en-ciel. Enfin, lorsque le soleil est haut de 42° 2', l'arc disparaît tout à fait au-dessous de l'horizon. C'est pourquoi le phénomène de l'arc-en-ciel n'a jamais lieu que le matin et le soir.

Tout ce qui précède s'applique à l'arc intérieur. Quant à l'arc extérieur, il est formé par des rayons qui ont subi deux réflexions, comme le montre le rayon S'*tdfe*O dans la goutte *p*. L'angle S'IO, formé par le rayon émergent et le rayon incident, se nomme encore

l'angle de déviation. Ici cet angle n'est plus susceptible d'un maximum, mais d'un minimum qui varie pour chaque espèce de rayons et auquel correspondent encore les rayons efficaces. On constate par le calcul, que, pour les rayons violets, l'angle minimum est de 54° 7', et, pour les rayons rouges, seulement de 50° 57; ce qui explique pourquoi l'arc rouge est ici intérieur et l'arc violet extérieur. Comme à chaque réflexion intérieure dans la goutte de pluie, il y a perte de lumière, l'arc-en-ciel extérieur offre toujours des teintes plus faibles que l'arc intérieur. L'arc extérieur cesse d'être visible lorsque le soleil est à plus de 54 degrés au-dessus de l'horizon.

La lune produit quelquefois des arcs-en-ciel, comme le soleil, mais ils sont très-pâles.

755. **Aurore boréale.** — On nomme *aurore boréale*, ou plutôt *aurore polaire*, un phénomène lumineux extrêmement remarquable qui apparaît fréquemment, dans l'atmosphère, aux deux pôles terrestres. Quand le phénomène se produit au pôle nord, on lui donne le nom d'*aurore boréale*, celui d'*aurore australe* lorsqu'il apparaît au pôle sud. Les aurores boréales paraissent plus nombeuses que les aurores australes; mais c'est peut-être parce qu'on est mieux à même de les observer. Nous extrayons, du *Traité de Météorologie* de MM. Becquerel, la description suivante d'une aurore boréale observée à Bossekop, en Laponie norvégienne, à 70 degrés de latitude, dans l'hiver de 1838 à 1839.

Le soir, entre 4 et 8 heures, la brume qui règne habituellement au nord de Bossekop se colore à la partie supérieure. Cette lueur devient plus régulière et forme un arc vague, d'un jaune pâle, otnrnant sa concavité vers la terre, et dont le sommet se trouve sensiblement dans le méridien magnétique.

Bientôt des stries noirâtres séparent régulièrement les parties lumineuses de l'arc. Des rayons lumineux se forment, s'allongent et se raccourcissent lentement ou instantanément, leur éclat augmentant et diminuant subitement. Les pieds de ces rayons offrent toujours la lumière la plus vive et forment un arc plus ou moins régulier. La longueur des rayons est très-variée, mais tous convergent vers un même point du ciel, indiqué par le prolongement de l'extrémité sud de l'aiguille d'inclinaison; parfois les rayons se prolongent jusqu'à leur point de concours, et figurent ainsi le fragment d'une coupole lumineuse.

L'arc continue à monter vers le zénith, présentant, dans sa lueur, un mouvement ondulatoire. Parfois un de ses pieds, et même tous

les deux, abandonnent l'horizon. Alors les plis sont plus prononcés et plus nombreux; l'arc n'est plus qu'une longue bande de rayons qui se contourne et se sépare en plusieurs parties, en formant des courbes gracieuses qui se replient sur elles-mêmes et offrent ce qu'on appelle la *couronne boréale*. L'éclat des rayons, variant subitement d'intensité, atteint celui des étoiles de première grandeur; les rayons dardent avec rapidité, les courbes se forment et se déroulent comme les plis et replis d'un serpent (fig. 555). Puis les

Fig. 555.

rayons se colorent : la base est rouge, le milieu vert, le reste conserve sa teinte jaune clair. Enfin, l'éclat diminue, les couleurs disparaissent, tout s'affaibit peu à peu ou s'éteint subitement.

La commission scientifique du Nord a observé, en 200 jours, 150 aurores boréales; mais il paraît qu'aux pôles les nuits sans aurore boréale sont tout à fait exceptionnelles, en sorte qu'on peut admettre qu'il y en a toutes les nuits, seulement d'une intensité très-variable. Les aurores boréales sont visibles à des distances considérables du pôle et sur une étendue immense. Quelquefois, une même aurore boréale a été vue, en même temps, à Moscou, à Varsovie, à Rome, à Cadix.

On a fait de nombreuses hypothèses sur la cause des aurores boréales. La direction constante de leurs arcs par rapport au méridien magnétique, et les perturbations qu'elles exercent sur les bous-

soles (547), montrent qu'elles doivent être attribuées à des courants électriques qui se dégagent des pôles vers les hautes régions de l'atmosphère. Selon M. de La Rive, l'aurore boréale serait due à des décharges électriques s'opérant dans les régions polaires, entre l'électricité positive de l'atmosphère et l'électricité négative du globe terrestre ; électricités séparées elles-mêmes par l'action directe ou indirecte du soleil, principalement dans les régions équatoriales.

CLIMATOLOGIE.

756. **Températures moyennes.** — On nomme *température moyenne*, ou simplement *température* d'un jour, celle qu'on obtient en faisant la somme de 24 observations thermométriques prises successivement d'heure en heure, et en la divisant par 24. L'expérience a appris qu'on obtient très-approximativement cette température, en prenant la moyenne entre les températures maximum et minimum du jour et de la nuit, lesquelles se déterminent à l'aide des thermomètres à maxima et à minima. Ceux-ci doivent être à l'abri des rayons solaires, élevés au-dessus du sol, et éloignés de tout corps qui pourrait les influencer par son rayonnement.

La température d'un mois est la moyenne de celles des 30 jours, et la température de l'année est la moyenne de celles des 12 mois. Enfin, la température d'un lieu est la moyenne de sa température annuelle pendant un grand nombre d'années. La température de Paris est de 10°,8. Dans tous les cas, ces températures sont celles de l'air, et non celles du sol (381).

757. **Causes qui modifient la température de l'air.** — Les causes qui font varier la température de l'air sont principalement la latitude, l'altitude, la direction des vents et la proximité des mers.

1° *Influence de la latitude.* — L'influence de la latitude résulte du plus ou moins d'obliquité des rayons solaires, car la quantité de chaleur absorbée étant d'autant plus grande que les rayons approchent davantage de l'incidence normale (354), il en résulte que la chaleur absorbée par le sol décroît de l'équateur vers les pôles, puisque les rayons sont de plus en plus obliques à l'horizon. Toutefois, cette perte est compensée en partie, pendant l'été, dans les zones tempérées et dans les zones glaciales, par la longueur des jours. Sous l'équateur, où la longueur des jours est constante, la température est à peu près invariable; à la latitude de Paris, et même dans les contrées plus septentrionales, où les jours sont très-inégaux, la température varie beaucoup;

mais, l'été, elle s'élève quelquefois presque aussi haut que sous l'équateur. Du reste, l'abaissement de la température résultant de la latitude est lent; ainsi, en France, par exemple, il faut avancer vers le nord de 185 kilomètres pour trouver un refroidissement d'un degré dans la température moyenne de l'air.

2° *Influence de l'altitude.* — L'altitude, c'est-à-dire la hauteur au-dessus du niveau des mers, imprime à la température de l'atmosphère un décroissement beaucoup plus rapide que celui qui résulte de la latitude. En effet, dans une ascension sur le Mont-Blanc, Saussure a observé un abaissement de température de 1 degré pour une hauteur de 144 mètres, et M. de Humboldt, sur le Chimboraço, a trouvé 1 degré d'abaissement pour 218 mètres. En prenant la moyenne entre ces deux nombres, on a un refroidissement de 1 degré pour une hauteur de 181 mètres, ce qui donne un décroissement de température près de mille fois plus rapide pour l'altitude que pour la latitude.

Le refroidissement de l'air, à mesure qu'on s'élève dans les hautes régions de l'atmosphère, se constate dans les ascensions aérostatiques; ce qui le prouve encore, ce sont les neiges perpétuelles qui recouvrent les sommets des hautes montages. Quant à sa cause, elle est due à la grande raréfaction de l'air, laquelle diminue nécessairement son pouvoir absorbant; ce refroidissement résulte encore de l'éloignement du sol, qui ne peut échauffer l'air par son contact, et enfin du grand pouvoir diathermane des gaz.

La loi de l'abaissement de la température, quand on s'élève dans l'atmosphère, n'est pas connue, à canse des nombreuses causes perturbatrices qui tendent à la modifier, lesquelles sont les vents régnants, le degré d'humidité, l'heure de la journée, etc. L'expérience apprend que la différence de température de deux lieux inégalement élevés n'est point proportionnelle à la différence de niveau, mais que pour des hauteurs peu considérables on peut admettre approximativement cette loi. On évalue moyennement l'abaissement de la température de l'air à 1° pour 187 mètres d'élévation dans la zone torride, et à 1° pour 150 mètres dans la zone tempérée; mais ces nombres peuvent varier beaucoup selon les circonstances locales.

3° *Influence de la direction des vents.* — Les vents participant nécessairement de la température des contrées qu'ils ont traversées, leur direction, pour un même lieu, a une grande influence sur la température de l'air. A Paris, le vent le plus chaud est le vent du sud; viennent ensuite les vents du sud-est, du sud-ouest,

d'ouest, d'est, du nord-ouest, du nord, et enfin le vent du nord-est, qui est le plus froid. Du reste, le caractère des vents change avec les saisons : le vent d'est, par exemple, qui est froid l'hiver, est chaud l'été.

4° *Influence de la proximité des mers.* — La proximité des mers tend à élever la température de l'air et à la rendre plus uniforme. En effet, on observe que, sous les tropiques et dans les régions polaires surtout, la température des mers est toujours plus élevée que celle de l'atmosphère. Quant à l'uniformité de température des mers, l'expérience apprend que, dans les régions tempérées, c'est-à-dire de 25 à 50 degrés de latitude, la différence de température entre le maximum et le minimum d'un jour ne dépasse pas, en mer, 2 ou 3 degrés, tandis que sur les continents cette différence peut aller jusqu'à 12 ou 15 degrés. Dans les îles, l'uniformité de température est très-sensible, même pendant les plus fortes chaleurs. En pénétrant dans les continents, les hivers, à latitude égale, deviennent plus froids, et la différence entre les températures des étés et des hivers devient plus grande.

758. **Lignes isothermes.** — Lorsqu'on joint entre eux, sur une carte, tous les points dont la température moyenne est la même, on obtient des courbes que M. de Humbolt a, le premier, fait connaître, et qu'il a désignées sous le nom de *lignes isothermes*. Si la température d'un lieu ne variait qu'avec l'obliquité des rayons solaires, c'est-à-dire qu'avec la latitude, les lignes isothermes seraient toutes des parallèles à l'équateur; mais comme cette température varie avec plusieurs causes locales et surtout avec la hauteur, ces lignes sont toujours plus ou moins sinueuses. Toutefois, sur les mers, elles s'éloignent peu du parallélisme. On considère encore des *lignes isothères* (d'égal été), et des *lignes isochimènes* (d'égal hiver). Enfin, on nomme *zone isotherme* l'espace compris entre deux lignes isothermes.

759. **Climats.** — On entend par *climats* un certain nombre de zones isothermes caractérisées par leur température moyenne annuelle, par leurs températures estivales et hivernales, et par les limites dans lesquelles sont comprises ces températures. On distingue sept climats classés d'après leurs températures moyennes : 1° *climat brûlant*, de 27°,5 à 25 degrés; — 2° *climat chaud*, de 25° degrés à 20 degrés; — 3° *climat doux*, de 20 degrés à 15 degrés; — 4° *climat tempéré*, de 15 degrés à 10 degrés; — 5° *climat froid*, de 10 degrés à 5 degrés; — 6° *climat très-froid*, de 5 degrés à zéro; — 7° *climat glacé*, au-dessous de zéro.

Ces climats se divisent eux-mêmes en *climats constants*, dont la différence de température entre l'hiver et l'été ne dépasse pas 6 ou 8 degrés; en *climats variables*, dont la même différence s'élève de 16 à 20 degrés; et en *climats excessifs*, pour lesquels cette différence est plus grande que 30 degrés. Les climats de Paris et de Londres sont variables; ceux de Pékin et de New-York sont excessifs. Les climats des îles sont généralement peu variables, la température de la mer étant à peu près constante; de là encore la distinction en *climats marins* et en *climats continentaux*. Le caractère des climats marins est que la différence de température entre l'été et l'hiver est toujours beaucoup moindre que pour les climats continentaux. Du reste, la température plus ou moins élevée n'est pas le seul caractère qui détermine les climats; ils le sont encore par le plus ou moins d'humidité de l'air, par la quantité et la fréquence des pluies, par le nombre des orages, par la direction et l'intensité des vents, enfin par la nature du sol. Ce sont toutes ces causes réunies qui font que l'étude des climats, ou *climatologie*, est encore une science fort peu connue.

760. **Distribution de la température à la surface du globe.** — La température de l'air, à la surface du globe, va en décroissant de l'équateur aux pôles; mais elle est soumise à des causes perturbatrices si nombreuses et tellement locales, que son décroissement ne paraît soumis à aucune loi générale. On ne peut, jusqu'ici, que constater, par des observations nombreuses, la température moyenne de chaque lieu, ou les températures maxima et minima. Le tableau suivant présente un résumé de la distribution de la chaleur dans l'hémisphère septentrional.

Températures moyennes à diverses latitudes.

Abyssinie	31°,0	Paris	10°,8
Calcutta	28°,5	Londres	10°,4
Jamaïque	26°,1	Bruxelles	10°,2
Sénégal (Saint-Louis)	24°,6	Strasbourg	9°,8
Rio-Janeiro	23°,1	Genève	9°,7
Le Caire	22°,4	Boston	9°,3
Constantine	17°,2	Stockholm	5°,6
Naples	16°,7	Moscou	3°,6
Mexico	16°,6	Saint-Pétersbourg	3°,5
Marseille	14°,1	Mont Saint-Gothard	— 1°,0
Constantinople	13°,7	Mer du Groënland	— 7°,7
Pékin	12°,7	Ile Mellville	— 18°,7

Les températures ci-dessus sont des températures moyennes; la plus haute température observée à la surface du globe a été de 47°,4 à Esné, en Égypte, et la plus basse, de — 56°,7, à Fort-Reliance, au nord de l'Amérique; ce qui donne une différence de 104°,1 entre les températures observées sur différents points du globe.

La plus haute température observée à Paris a été de 38°,4, le 8 juillet 1793, et la plus faible de — 23°,5, le 26 décembre 1798.

Les navigateurs n'ayant jamais été jusqu'aux pôles de la terre, à cause des glaces, on ne connaît pas la température de ces points. On a d'abord admis, dans notre hémisphère, l'existence d'un seul *pôle glacial*, c'est-à-dire d'un seul point offrant un maximum de froid. Mais les inflexions que présentent les lignes isothermes dans l'hémisphère boréal ont fait voir qu'il existe dans cet hémisphère deux pôles du froid, l'un en Asie, au nord du golfe Taymour, et l'autre en Amérique, au nord du détroit de Barow, tous les deux à environ 15 degrés du pôle boréal de la terre. On a évalué la température moyenne du premier de ces pôles, à — 17 degrés, et celle du second à — 19. Quant à l'hémisphère austral, on ne possède pas assez d'observations pour savoir s'il s'y trouve un ou deux pôles du froid, et pour en déterminer la position.

761. **Températures des lacs, des mers et des sources.**— La température de la mer, entre les tropiques, est généralement à peu près la même que celle de l'air; dans les régions polaires, la mer est toujours plus chaude que l'atmosphère.

La température de la mer, sous la zone torride, est constamment de 26 à 27 degrés à la surface; elle diminue quand la profondeur augmente, et, dans les régions tempérées comme dans les régions tropicales, la température de la mer, à de grandes profondeurs, se maintient entre 2°,5 et 3°,5. On explique la basse température des couches inférieures par l'effet de courants sous-marins qui portent vers l'équateur l'eau froide des mers polaires.

La température des lacs présente des variations beaucoup plus grandes que celle des mers; leur surface, qui peut se congeler pendant l'hiver, s'échauffe l'été jusqu'à 20 ou 25 degrés. Le fond, au contraire, conserve sensiblement une température de 4 degrés, qui est celle du maximum de densité de l'eau (262).

Les sources, provenant des eaux pluviales qui se sont infiltrées dans l'écorce du globe à des profondeurs plus ou moins considérables, tendent nécessairement à se mettre en équilibre de température avec les couches terrestres qu'elles traversent (381). Par conséquent, lorsqu'elles arrivent à la surface du sol, leur tempéra-

ture dépend de la profondeur qu'elles ont atteinte; si cette profondeur est celle de la couche invariable, la température des sources est de 11 à 12 degrés dans nos contrées, où telle est la température de cette couche, et à peu-près aussi la température moyenne annuelle. Toutefois, si la source est peu abondante, sa température est élevée en été et refroidie en hiver par celle des couches qu'elle traverse pour arriver de la couche invariable jusqu'à la surface du sol. Mais si les sources arrivent d'une profondeur plus grande que celle à laquelle est située la couche invariable, leur température peut dépasser de beaucoup la température moyenne du lieu, et elles prennent alors le nom d'*eaux thermales*. Voici la température de quelques eaux thermales :

En France.	Vichy	40°
—	Mont Dore	44°
—	Bourbonne	50°
—	Dax (Landes)	60°
—	Chaudes-Aigues	88°
En Amérique.	Trincheras, près Puerto-Cabello	97°
En Islande.	Le Grand-Geyser, à 20 mètres de profondeur.	124°

Par leur haute température, les eaux thermales acquièrent la propriété de dissoudre plusieurs des substances minérales qu'elles rencontrent dans leur trajet, et elles se désignent alors sous le nom d'*eaux minérales*. Les substances qu'elles tiennent en dissolution sont, le plus souvent, les acides sulfureux, sulfhydrique, chlorhydrique, sulfurique, et des sulfures, des hyposulfites des sulfates, des carbonates, des chlorures, des iodures.

La température des eaux thermales n'est point modifiée, en général, par l'abondance des pluies ou par la sécheresse; mais elle l'est par les tremblements de terre, après lesquels on l'a vue quelquefois s'élever, d'autres fois s'abaisser.

762. **Distribution des eaux à la surface du globe.** — La distribution des eaux, à la surface du globe, exerce une grande influence sur les climats. Les eaux présentent une superficie beaucoup plus grande que celle des continents, et leur distribution est très-inégale dans les deux hémisphères. En effet, la surface du globe, en myriamètres carrés, étant de 5 100 000, on trouve que celle des mers et des lacs est de 3 700 000 myriamètres carrés, et celle des continents et des îles de 1 400 000; c'est-à-dire que la surface des eaux est à peu près trois fois plus grande que la surface des terres. Dans l'hé-

misphère austral, la surface des mers est plus grande que dans l'hémisphère boréal dans le rapport de 13 à 9.

La profondeur des mers est très-variable. La sonde rencontre le fond, en général, à 300 ou 400 mètres; mais, en pleine mer, elle descend souvent à 1200, et quelquefois elle n'atteint pas le fond à 4000 mètres.

D'après ces nombres, la masse totale des eaux, à la surface du globe, ne dépasse pas une couche liquide qui aurait 1000 mètres de hauteur et envelopperait toute la terre.

FIN.

APPENDICE — 1re PARTIE

PROBLÈMES DE PHYSIQUE
AVEC SOLUTION
DONNÉS EN SUJET DE COMPOSITION
A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS.

PROBLÈMES SUR LES POIDS SPÉCIFIQUES.

I

On a un vase cylindrique dont le diamètre intérieur est $0^m,1$; ce vase reposant sur un plan horizontal, par sa base, on y verse 12 kilogrammes de mercure ; on demande à quelle hauteur le liquide s'élèvera dans le cylindre, la densité du mercure étant 13,596.

Si l'on représente par R le rayon intérieur du vase, son fond intérieur le sera par πR^2, et comme, d'après l'énoncé, $R = 5$ centimètres, et que $\pi = 3,141592...$, le fond du vase égale $3,141592 \times 25 = 78^{\text{cent. car.}},54$.

Par conséquent, en représentant par H la hauteur qu'atteint le mercure dans le vase, le volume de ce liquide est $78^{\text{cent. car.}},54 \times H$. Mais d'après la formule $P = VD$ [1], on a aussi $V = \frac{P}{D} = \frac{12000^{gr}}{13,596} = 882^{\text{cent. cub.}},612$; on a donc $78,54 \times H = 882,612$, d'où $H = 11^c,24$.

II

Calculer le poids du mercure, à la température de 26 degrés centigrades, que contiendrait un vase conique dont la hauteur serait de $0^m,87$, et dont la base aurait $0^m,23$ de rayon. — On sait que la densité du mercure, à la température de zéro, est de 13.596, la densité de l'eau étant prise pour unité (à 4 degrés), et le coefficient de dilatation cubique du mercure étant 0,00018.

Soient V le volume du cône, en décimètres cubes, R le rayon de sa base, et H sa hauteur. On sait, en géométrie, que

1. Dans les applications de la formule $P = VD$, il importe d'observer, ainsi qu'il a été dit au paragraphe 107, que V étant compté en décimètres cubes, P doit l'être en kilogrammes, et si V est compté en centimètres cubes, P doit l'être en grammes; réciproquement, si P est évalué en kilogrammes ou en grammes, V doit l'être en décimètres ou en centimètres cubes. Enfin, si le volume V était mesuré en mètres cubes, comme cela se présente dans quelques-uns des problèmes qu'on va résoudre, chaque unité de P correspondrait à 1000 kilogrammes, car un mètre cube contenant 1000 décimètres cubes, il s'ensuit qu'un mètre cube d'eau pèse 1000 kilogrammes, et, par conséquent, que pour une autre substance, deux, trois fois plus dense que l'eau, le mètre cube pèse deux, trois fois 1000 kilogrammes.

On doit encore observer que la formule $P = VD$ ne s'applique pas immédiatement aux gaz. C'est pourquoi dans tous les problèmes où il s'agira de calculer le poids d'un certain volume de gaz, on devra d'abord calculer le poids d'un égal volume d'air, en se fondant sur ce qu'un litre d'air à zéro et à la pression $0^m,76$, pèse $1^{gr},3$; puis multiplier le poids obtenu par la densité du gaz donné, ce qui découle de ce que les densités ou poids spécifiques des gaz marquent combien ces corps pèsent par rapport à l'air.

$$V = \pi R^2 \times \frac{H}{3} = 3{,}1416 \times (2^{d}{,}3)^2 \times \frac{8{,}7}{3}.$$

Effectuant les calculs, on trouve $V = 48^{déc.cub.}{,}195$.

Pour obtenir le poids du mercure contenu, il reste, d'après la formule $P = VD$, à multiplier le nombre 48,195 qu'on vient d'obtenir, par la densité du mercure à 26 degrés. Or, en représentant par d' cette densité et par d celle du mercure à zéro, on a vu (252, 4°) que $d' = \frac{d}{1 + Dt}$, D étant le coefficient de dilatation du mercure.

Posant donc $D = 0{,}00018$, $t = 26$, et $d = 13{,}596$, on a $d' = 13{,}533$.

Par conséquent, le poids demandé est

$$P = 48^{déc.cub.}{,}195 \times 13{,}533 = 652^{hil.}{,}123.$$

III

Un rouleau cylindrique de bois de chêne a $0^{m}{,}3$ de diamètre, $2^{m}{,}5$ de longueur; le poids spécifique de bois de chêne est 1,17. On demande le volume et le poids du rouleau.

Soient R le rayon du rouleau, H sa longueur et V son volume : on a

$$V = \pi R^2 H = 3{,}141592 \times 2^{déc.car.}{,}25 \times 25^{d} = 176^{déc.cub.}{,}71,$$

et en représentant par P son poids, on a, d'après la formule $P = VD$,

$$P = 176^{déc.cub.}{,}71 \times 1^{k}{,}17 = 206^{k}{,}76.$$

IV

Un verre à vin de Champagne, de forme conique, a intérieurement $0^{m}{,}06$ de diamètre au bord; il a été complétement rempli de mercure, d'eau et d'huile, en proportion telle que la couche formée par chacun de ces liquides a $0^{m}{,}05$ d'épaisseur.

On sait que la densité du mercure est 13,596, celle de l'huile 0,915, et celle de l'eau 1. Calculer le poids du mercure, de l'eau et de l'huile, en négligeant l'influence de la température sur la densité de ces liquides.

Fig. 556.

D'après l'énoncé, on a $om = 3^{c}$ (fig. 556), et $ok = ki = ia = 5$. De plus, les triangles oma, kna et ipa étant semblables, il s'ensuit que $ip = \frac{1}{3}\, om = 1$, et $kn = \frac{2}{3}\, om = 2$.

Cela posé, le mercure se trouvant à la partie inférieure, puis l'eau et l'huile (89), le volume du cône abp occupé par le mercure égale $\pi \overline{ip}^2 \times \frac{ai}{3} = \frac{3{,}1416 \times 1 \times 5}{3} = 5^{cent.cub.}{,}236$.

Les volumes de l'eau et de l'huile sont des troncs de cônes qui se mesurent au moyen de la formule connue $\pi(R^2 + r^2 + Rr) \times \frac{H}{3}$, dans laquelle R et r sont les rayons des bases du tronc et H sa hauteur. Par conséquent, le volume d'eau

$$bcnp = \frac{3{,}141592 \times 5}{3}(4 + 1 + 2) = 36^{cent.cub.}{,}652,$$

et le volume d'huile $cdmn = \frac{3{,}14159 \times 5}{3}(9 + 4 + 6) = 99^{cent.cub.}{,}484$.

Une fois ces volumes connus, on aura les poids demandés, d'après la formule $P = VD$, en multipliant chaque volume par la densité correspondante. On trouve ainsi que le poids du mercure est $5,236 \times 13,596 = 71^{gr},188$; celui de l'eau, $36,652 \times 1 = 36^{gr},652$; et celui de l'huile, $99,484 \times 0,915 = 91^{gr},027$.

V

Un parallélipipède de glace dont les dimensions sont $10^m,50$, $15^m,75$ et $20^m,45$, plonge dans l'eau de la mer; la densité de la glace est 0,930, et celle de l'eau de mer est 1,026. On demande quelle sera la hauteur du parallélipipède au-dessus de la surface de la mer.

Supposons le parallélipipède disposé comme le montre la figure 557, et soient ses trois arêtes AB, AC et AD respectivement égales à $20^m,45$, $15^m,75$, $10^m,50$. Le volume d'un parallélipipède étant égal au produit de ses trois dimensions, si l'on représente par V le volume de toute la masse de glace, on a, en décimètres cubes, $V = AB \times AC \times AD$, et son poids est $P = AB \times AC \times AD \times 0,930$.

Fig. 557.

De même, en représentant par V' le volume de glace immergé, et par P' le poids d'eau de mer déplacée, on a

$$V' = AB \times AC \times DE, \qquad \text{et } P' = AB \times AC \times DE \times 1,026.$$

Or, d'après la condition d'équilibre des corps flottants (98), le poids de l'eau déplacée est égal au poids de tout le corps flottant; on a donc $P = P'$, ou, supprimant les facteurs communs, $AD \times 0,920 = DE \times 1,026$;

$$\text{d'où} \qquad DE = \frac{AD \times 0,930}{1,026} = \frac{105^d, \times 0,930}{1,026} = 95^{déc.},17.$$

Donc, la hauteur de l'eau est $105 - 95,7 = 9^{déc.},83$.

VI

L'air pèse $\frac{1}{770}$ du poids de l'eau; on demande quel est le poids de l'air contenu dans un cylindre dont la hauteur est $0^m,8$, et la circonférence de la base $0^m,3$. (On ne tiendra pas compte de la température.)

R étant le rayon de la base, on a $2\pi R = 3$ déc., d'où $R = \frac{3}{2 \times 3,1416} = 0^{déc.},477$.

Or, on sait que le volume d'un cylindre a pour mesure le produit de sa base par sa hauteur, c'est-à-dire $\pi R^2 \times H$, formule qui donne pour le volume du cylindre ci-dessus $3,1416 \times (0^{déc.},477)^2 \times 8^{déc.} = 5^{déc.cub.},718^{cent.cub.}$ Or, si le cylindre était rempli d'eau, le poids correspondant au volume qu'on vient d'obtenir serait $5^k,718^{gr}$; par conséquent, puisqu'il est plein d'air qui pèse 770 fois moins, le poids de l'air contenu dans le cylindre est $\frac{5^k,718}{770} = 7^{gr},426$.

VII

Intérieurement la hauteur d'un cylindre creux est de 369 millimètres, et son diamètre de 246 millimètres; on demande le poids de l'alcool contenu dans ce cylindre, la densité de ce liquide étant 0,863.

La formule connue $P = VD$ donne $P = \pi R^2 HD = 15^k,136^{gr},5$.

VIII

On fabrique avec de l'or, dont la densité est 19,362, des feuilles qui ont un dix-millième de millimètre d'épaisseur; quelle surface pourrait-on recouvrir avec 10 grammes d'or?

En appelant x la surface demandée, en centimètres carrés, on a

$$x \times 0^{c},00001 \times 19,362 = 10^{gr}, \qquad \text{d'où } x = 5^{m.car.},16^{déc.car.},47^{cent.car.}$$

IX

On donne un cylindre de fer du poids de 21 kilogrammes; sa hauteur est de $2^{m},50$; la densité du fer est 7,788; on demande le diamètre du cylindre.

En représentant par R le rayon du cylindre, son volume est $\pi R^2 H$, et son poids étant P, on a $\pi R^2 HD = P$, d'où $R = \sqrt{\frac{P}{\pi HD}}$;

remplaçant, il vient $R = \sqrt{\frac{21}{611,6695}} = \sqrt{0,0343} = 0^{d},18.$

X

Deux vases de formes coniques et de même poids ont intérieurement $0^{m},25$ de hauteur, et $0^{m}12$ de diamètre à leur bord supérieur; l'un est rempli d'acide sulfurique dont la densité est 1,84, l'autre est rempli d'éther dont la densité est 0,71. On demande quelle est la différence entre les poids des deux vases lorsqu'ils sont ainsi remplis.

On a $$V = \frac{\pi R^2 H}{3} = \frac{3,1416 \times 36 \times 25^{c}}{3} = 942^{cent.cub.},48.$$

Pour l'acide sulfurique, on a $P = 942,48 \times 1,84$

Pour l'éther. . . . . $P' = 942,48 \times 0,71$

d'où la différence $(P - P') = (1,84 - 0,71)\ 942,48 = 1^{kil},065^{gr}.$

XI

Étant donnée une sphère de cuivre de $0^{m},18$ de rayon, creuse et contenant une sphère de platine de $0^{m},05$ de rayon, de telle sorte qu'il n'y ait aucun vide entre les deux sphères, on demande de calculer le poids de la masse ainsi formée, sachant que la densité du platine est 21,50, et celle du cuivre, 8,85.

Volume du platine $= \frac{4\pi r^3}{3}$, volume du cuivre $= \frac{4\pi (R^3 - r^3)}{3}$; poids du platine $= \frac{21,50 \times 4\pi r^3}{3}$, poids du cuivre $= \frac{8,85 \times 4\pi (R^3 - r^3)}{3}$. Somme des poids $= \frac{4\pi}{3}(21,5\, r^3 + 8,85\, R^3 - 8,85\, r^3) = 4,1888\,(12,65 \times 5^3 + 8,85 \times 18^3) = 222^{k},820^{gr},91.$

XII

La grande pyramide d'Égypte est à base carrée, le côté de la base est de $234^{m},8$, et la hauteur était primitivement de $146^{m},18$ au-dessus du sol, on demande le poids de

cette pyramide en admettant qu'elle soit pleine et que la pierre dont elle est formée ait pour densité 2,75.

on a $$V = (234^m,8)^2 \times \frac{146^m,18}{3},$$

et $$P = (234^m,8)^2 \times \frac{146,18}{3} \times 2,75 \times 1000^{kil.} = 7\,387\,467\,475 \text{ kil.}$$

XIII

Calculer le poids d'un bloc de granit qui a la forme d'un tronc de pyramide à bases carrées, sachant que le côté de la base inférieure est $3^m,55$, celui de base supérieure $0^m,87$, la hauteur du tronc $2^m,78$, et le poids du mètre cube de granit 2780 kilogrammes.

Volume du tronc $= 15^{m.cub.},241,721$; poids $= 2780^k \times 15,241721 = 42271^k,984^{gr}$.

XIV

On demande le prix d'un tuyau de conduite en fonte, ayant $0^m,245$ de diamètre intérieur, $0^m,014$ d'épaisseur, et 2134^m de longueur; la densité de la fonte est 7,207, et son prix $0^{fr},20$ le kilogramme.

$V = \pi H (R^2 - r^2) = 3,1416 \times 2134^m \times 0^{m.car.},003626 = 24^{m.cub.},309^{déc.cub.}$, $336^{cent.cub.}$; poids $= 24^{m.cub.},309336 \times 7,207 \times 1000 = 175197^{kil},385^{gr}$; prix $= 35039^{fr},48$.

XV

Un fil cylindrique en argent, de $0^m,0015$ de diamètre, pèse $3^{gr},2875$; on veut le recouvrir d'une couche d'or de $0^m,0004$ d'épaisseur; on demande le poids de l'or ainsi employé, sachant que le poids spécifique de l'argent est 10,47, et celui de l'or 19,26.

Soient r le rayon du cylindre d'argent, et R le rayon du même cylindre recouvert d'or, on a

$$r = 0^c,075,\ R = 0^c,095, \text{ et } r^2 = 0^{cent.car.},005625,\ R^2 = 0^{cent.car.},009025.$$

$$\text{Volume du cylindre d'argent} = \pi r^2 H = 0,0176715 \times H.$$

$$\text{Poids du même} = 0,0176715 \times 10,47 \times H = 3^{gr},2875;\ \text{d'où } H = 17^c,768.$$

$$\text{Vol. de la couche d'or} = \pi H (R^2 - r^2) = 3,1416 \times 17,768 \times 0,0034 = 0^{c.cub.},189787.$$

XVI

On a, dans un tube capillaire, une colonne de mercure qui, à zéro degré, pèse 1^{gr}, et a une longueur de $0^m,137$; on demande le diamètre du tube, sachant que la densité du mercure est 13,598.

On a $P = \pi r^2 HD$, d'où $r = \sqrt{\frac{P}{\pi HD}} = \sqrt{\frac{1}{3,1416 \times 13,7 \times 13,598}}$;

d'où $r = 0^c,0413$; donc le diamètre $= 0^m,000826$.

XVII

Quel effort exigerait, pour être soutenu dans du mercure à zéro, un décimètre cube de platine, la densité du mercure étant supposée égale à 13,6 et celle du platine à 21,5?

D'après la formule connue $P = VD$, le poids du décimètre cube de platine, en kilogrammes, est $1 \times 21,5 = 21^k,5$; par la même formule, le poids du mercure déplacé par le platine est $1 \times 13,6 = 13^k,6$. Or, d'après le principe d'Archimède, le platine immergé perd une partie de son poids égale à celui du mercure qu'il déplace : son poids dans ce liquide est donc $21^k,5 - 13^k,6$, ou $7^k,9$; tel est donc l'effort à faire pour le soutenir en suspension au milieu de la masse du mercure.

XVIII

On emploie, comme mesure de litre, un vase cylindrique dont, intérieurement, la hauteur est deux fois le diamètre de la base. Ce vase est en zinc dont la densité est 7,19, et ses parois ont $0^m,005$ d'épaisseur; on demande son poids.

Le volume intérieur $= \pi r^2 h = 4\pi r^3$, puisque $h = 4r$. Or, le volume étant 1, on a

$$4\pi r^3 = 1, \text{ d'où } r = \sqrt[3]{\frac{1}{4 \times 3,1416}} = \sqrt[3]{0,079577} = 0^d,430, \text{ et } h = 1^d,72.$$

En représentant par R le rayon extérieur, et par v le volume du zinc qui entre dans la paroi latérale, non compris le fond, on a

$$v = \pi h\,(R^2 - r^2) = 3,1416 \times 1^d,72 \times 0,0455 = 0^{dec.cub.},245861.$$

Quant au volume du fond, il égale $\pi R^2 \times 0^d,05 = 0^{dec.cub.},036191$; donc le volume total du zinc égale $0,245861 + 0,036191 = 0^{dec.cub.},282052$, d'où le poids

$$P = 0,282052 \times 7,19 = 2^k,027^{gr},954.$$

XIX

Un boulet de fonte pèse 12 kilogrammes; la densité de la fonte est 7,35 ; on demande le rayon de ce boulet et le poids de l'or nécessaire pour former autour de lui une couche de $0^m,0006$ d'épaisseur, la densité de l'or étant 19,26.

D'après la formule $P = VD$, on a $V = \frac{P}{D} = \frac{12}{7,35} = 1^{dec.cub.},63265$. Or, le boulet ayant la forme sphérique, son volume est représenté par la formule $\frac{4\pi R^3}{3}$; on a

$$\text{donc } \frac{4\pi R^3}{3} = 1^{dec.cub.},63265, \text{ d'où } R = \sqrt[3]{\frac{4,89795}{12,56636}} = 0^d,730.$$

Pour calculer le volume de la couche d'or, soit R' le rayon extérieur, lequel égale $0^d,730 + 0^d,006 = 0^d,736$; le volume V de cette couche étant égal à la différence entre le volume total et celui du boulet, on a

$$V = \frac{4\pi}{3}(R'^3 - R^3) = \frac{4 \times 3,1416 \times 0,009669}{3} = 0^{dec.cub.},0405015; \text{ d'où le poids}$$

de l'or est $40^{cent.cub.},5015 \times 19,26 = 780^{gr},059$.

XX

Un morceau de cuivre de forme cubique et du poids de $1^k,75$, est placé sur un tour et réduit à une sphère dont le diamètre est égal à 0,75 de la longueur du côté du cube primitif, la densité du cuivre étant 8,85, on demande le poids de la tournure de cuivre qu'on a obtenue.

Soit V le volume du cube, on a $V = \frac{P}{D} = \frac{1^k,75}{8,85} = 0^{déc.cub.},197740$; d'où le côté du cube égale $\sqrt[3]{0,197740} = 0^d,582$.

Donc le diamètre de la sphère $= 0,582 \times 0,75 = 0^d,4365$, le volume de la sphère $= \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{4 \times 3,1416 \times (0,21825)^3}{3} = 0^{déc.cub.},043,548$, et son poids $= 0,043548 \times 8,85 = 385^{gr},4$; donc enfin le poids de la tournure de cuivre est $1^k,750 - 0^k,385 = 1^k,365$.

XXI

On a un bloc de basalte qui a la forme d'un prisme droit dont la base est un hexagone régulier; le rayon du cercle circonscrit à l'hexagone est de $0^m,63$; la hauteur du prisme de $2^m,45$, et la densité du basalte égale 2,85; quel est le poids du bloc?

Soient R et r les rayons des cercles circonscrit et inscrit à l'hexagone, on a

$$r = \sqrt{R^2 - \frac{R^2}{4}} = \frac{R}{2}\sqrt{3}.$$

Remplaçant R par sa valeur $0^m,63$, on trouve $r = 0^m,54558$; donc, la surface de l'hexagone est $6 \times 0^m,63 \times \frac{0,54558}{2} = 0^{m.car.},974484$.

Le volume du prisme est donc $0^{m.car.},974484 \times 2^m,45$, et son poids $0^{m.car.},974484 \times 2^m,45 \times 2,85 = 6804^k,335^{gr}$.

XXII

Le poids spécifique du mercure étant 13,59 à 0°, on demande quel est à 100° le volume de 40 kilogrammes de ce liquide.

D'après la formule $P = VD$, qui donne $V = \frac{P}{D}$, le volume de 40^k à zéro est $\frac{40}{13,59}$; par conséquent à 100°, il est $\frac{40}{13,59}\left(1 + \frac{1}{5550} \times 100\right)$ (252), $\frac{1}{5550}$ étant le coefficient de dilatation du mercure. Effectuant les calculs, on trouve $V = 2^{lit.},996$.

XXIII

Déterminer les volumes de deux liquides dont la densité est, pour l'un, 1,3, et pour l'autre, 0,7 sachant que si on les mélange, le volume est égal à 3 litres et la densité à 0,9.

Soient v et v' les deux volumes demandés, on a d'abord $v + v' = 3^{lit.}$ [1]; et d'après la formule $P = VD$, le poids de chaque liquide étant $v \times 1,3$, et $v' \times 0,7$, on a $1,3 \cdot v + 0,7, v' = 0,9 \times 3$ [2]. Résolvant les équations [1] et [2], on trouve $v = 1$, $v' = 2$.

XXIV

Une lame triangulaire de cuivre, de $0^m,005$ d'épaisseur et de $1^m,25$ de côté, a été recouverte d'une couche d'argent de $0^m,00015$ d'épaisseur. La densité du cuivre est 8,95, celle de l'argent 10,47; on demande le poids de la lame ainsi argentée.

En appelant S la surface du triangle, a son côté, et V le volume de la lame, on a

$$S = \frac{a^2}{4}\sqrt{3} = \frac{(1^m,25)^2}{4} \times 1,7321 = 676^{déc.car.},60^{cent.car.},156;$$

$$V = 676^{déc.car.},60156 \times 0,05 = 33^{déc.rub.},830^{cent.cub},078;$$

$$\text{Poids du cuivre} = 33,830078 \times 8,95 = 302^k,779^{gr},198;$$

$$\text{Volume de l'argent} = 2 \times 676^{déc.car.},60156 \times 0,0015 = 2^{déc.cub.},02980468;$$

$$\text{Poids de l'argent} = 2,02980468 \times 10,47 = 21^k,252^{gr},045;$$

$$\text{Poids total} = 302^k,779^{gr},198 + 21^k,252,045 = 324^k,031^{gr},243.$$

XXV

Quel est le diamètre d'un fil de platine qui pèse 28 grammes par mètre de longueur, sachant que la densité du platine est 22,06 ?

Soit V le volume d'un mètre de fil, en centimètres cubes, on a $V = \pi r^2 \times 100$, et le poids $28^{gr} = \pi r^2 \times 100 \times 22,06$; d'où $r^2 = \frac{28}{3,1416 \times 2206} = 0^c,00404$, et $= 0^c,063$. Donc le diamètre demandé est $0^c,126$.

XXVI

Une boule de verre pèse 1 kilog.; on demande sa surface, sachant que la densité du verre est 2,7.

D'après la formule $P = VD$, on a $V = \frac{P}{D} = \frac{1000^{gr}}{2,7} = 370^{c.cub.},3707$.

Or, le volume de la boule étant $\frac{4\pi R^3}{3}$, on a $\frac{4\pi R^3}{3} = 370^{c.cub.},3707$; d'où $R = 4^c,45$.

Mais la surface de la boule étant S, on sait que $S = 4\pi R^2 = 2^{d.car.},48^{c.car.},846$.

XXVII

Les décimes nouveaux pèsent 10^{gr}, et sont composés d'un alliage de 0,95 de cuivre, 0,04 d'étain, et 0,01 de zinc; la densité du cuivre est 8,85, celle de l'étain 7,29, et celle du zinc 7,12; combien faudrait-il de ces pièces pour fournir le métal nécessaire à la fabrication d'une sphère de même alliage de $0^m,25$ de diamètre à zéro.

Le volume v d'une pièce de 10 centimes est, d'après l'énoncé et d'après la formule $V = \frac{P}{D}$, $v = \frac{9,5}{8,85} + \frac{0,4}{7,29} + \frac{0,1}{7,12} = \frac{17491735}{15311916}$.

Or, le volume de la sphère étant $\frac{4\pi R^3}{3}$, le nombre des pièces est

$$\frac{4\pi R^3}{3} : v = \frac{4 \times 3,1416 \times \overline{12^c,5}^3}{3} \times \frac{15311916}{17491735} = 7161,7.$$

XXVIII

Un verre à pied de forme conique contient un litre ; il a $0^m,25$ de diamètre à son bord supérieur, et il est rempli par de l'eau et du mercure, le poids de ces deux liquides

est le même et la densité du mercure est 13,596. On demande l'épaisseur de la couche formée par l'eau.

Soient V le volume total du cône, H sa hauteur, R le rayon de sa base, v le volume de l'eau, v' le volume du mercure, et d la densité de ce dernier liquide ; on a

$$V = \frac{1}{3}\pi R^2 H \text{ [1]}, \quad v + v' = 1 \text{ [2]}, \text{ et } v = v'd \text{ [3]}.$$

De l'équation [1] on tire, en y faisant $V = 1$ et $R = 0^m,125$, $H = 0^m,06111$; et les équations [2] et [3] donnent $v' = 0^{lit},068502$ et $v = 0^{lit.},931498$.

Or, les volumes V et v' étant semblables, sont entre eux comme les cubes de leurs hauteurs, c'est-à-dire que $\frac{V}{v'} = \frac{H^3}{h'^3}$, d'où

$$h' = H\sqrt[3]{v'} = 6^c,111\sqrt{0,068512} = 2^c,4994, \text{ et } h = H - h' = 3^c,6116.$$

XXIX

L'une des branches d'un siphon est remplie de mercure à une hauteur de $0^m,175$, l'autre est remplie d'un autre liquide à une hauteur de $0^m,42$; ces deux colonnes se faisant équilibre, on demande la densité du second liquide par rapport au mercure et à l'eau.

En représentant par d la densité par rapport au mercure et par d' la densité par rapport à l'eau, on a $1 \times 0,175 = 0,42 \times d$, et $13,6 \times 0,175 = 0,42 \times d'$; d'où $d = 0,416$ et $d' = 5,666$.

XXX

Un corps pèse $7^{gr},234$ dans l'air, $4^{gr},525$ dans l'eau, et $5^{gr},417$ dans un autre liquide, trouver la densité du corps et celle du second liquide par rapport à l'eau.

La densité du corps $= 2,670$, celle du liquide $= 0,670$.

XXXI

Une sphère creuse en argent pèse, quand elle est vide, $726^{gr},03$; pleine d'eau à 4°, elle pèse $2521^{gr},35$; la densité de l'argent étant 10,47, on demande quelle est la circonférence extérieure de cette sphère.

Le poids de l'eau contenue dans la sphère étant $2521^{gr},35 - 726^{gr},03 = 1795^{gr},32$ son volume intérieur est $1^{lit.},795,32$. Quant au volume de la masse d'argent qui forme les parois de la sphère, on a, d'après la formule $P = VD$,

$$V = \frac{P}{D} = \frac{726^{gr},03}{10,47} = 0^{lit.},069,343.$$

Donc le volume extérieur de la sphère est $1^{lit.},795,32 + 0^{lit.},069,34 = 1^{lit.},864,66$.

Or, le volume de la sphère étant, comme on sait, $\frac{4\pi R^3}{3}$, on a $\frac{4\pi R^3}{3} = 1^{d.cub.},86466$, d'où $R = 0^{d.},763$, et la circonférence $2\pi R = 0^m,4794$.

XXXII

On a un vase cylindrique dont le diamètre intérieur est $0^m,25$, on y verse 30 kilog. de mercure dont la densité est 13,6, et 2 kilog. d'alcool dont la densité est 0,79. On demande à quelle hauteur ces deux liquides s'élèveront dans le vase.

Soient R le rayon intérieur du vase cylindrique, x la hauteur de l'eau et y celle du mercure.

D'après la formule connue $P = VD$, on a, pour le volume de l'alcool, $\frac{P}{D} = \frac{2}{0,79}$, et, pour celui du mercure, $\frac{P}{D} = \frac{30}{13,6}$; mais ces volumes sont aussi représentés respectivement par $\pi R^2 x$ et $\pi R^2 y$, on a donc $\pi R^2 x = \frac{2}{0,79}$, et $\pi R^2 y = \frac{30}{13,6}$; d'où

$$x + y = \frac{2}{\pi R^2}\left(\frac{1}{0,79} + \frac{15}{13,6}\right) = 0^m,0965.$$

XXXIII

Un cylindre de fer a $2^m,55$ de longueur et pèse $41^{kil.}$; quel est le diamètre de la section perpendiculaire à l'axe du cylindre, sachant que la densité du fer est 7,788.

La section égale $\frac{V}{H} = \frac{P}{DH} = \frac{41}{7,788 \times 25,5}$; mais elle est aussi égale à $\frac{\pi D^2}{4}$; donc on a $\frac{\pi D^2}{4} = \frac{41}{7,788 \times 25,5}$, d'où $D = 0^m,0512$.

XXXIV

Un fragment de métal pèse, dans l'air $7^{gr},234$; dans l'eau, $4^{gr},523$; dans un liquide A, $5^{gr}.417$; dans un liquide B, $3^{gr},215$. On demande la densité du métal et de chacun des liquides A et B par rapport à l'eau.

Densité du métal, 2,66; densité du liquide A, 0,670; densité du liquide B, 1,482.

XXXV

On demande le poids d'une sphère d'or fondu, dont la circonférence, à la température zéro, est de $0^m,3248$, sachant que la densité de l'or fondu est 19,26.
Le rayon de la sphère est $0^m,05169$, et son poids $11^{kil}.,142^{gr}$.

XXXVI

Quel est le diamètre d'un fil d'or qui pèse 26^{gr} par mètre de longueur, la densité de l'or étant 19,36.

$$D = 0^m,001307.$$

XXXVII

Un vase de forme conique a $0^m,08$ de diamètre à sa base, et $0^m,12$ de hauteur; il est placé d'aplomb, et rempli de mercure et d'eau dans des proportions telles que le

poids du mercure est le triple du poids de l'eau. La température est zéro, la densité du mercure 13,598, et celle de l'eau 1. On demande l'épaisseur de chaque couche liquide,

Volume total $= \frac{1}{3}\pi R^2H$; volume du mercure $= \frac{1}{3}\pi r^2y$; et volume de l'eau $= \frac{1}{3}\pi(R^2H - r^2y)$. Donc le poids du mercure est $\frac{1}{3}\pi r^2yd$, et celui de l'eau $\frac{1}{3}\pi(R^2H - r^2y)$; ce qui donne, d'après l'énoncé, $\frac{1}{3}r^2yd = R^2H - r^2y$, d'où $y = \frac{3R^2H}{r^2(d+3)} = \frac{R^2}{r^2} \times \frac{3H}{d+3}$. Or, $\frac{R^2}{r^2} = \frac{H^2}{y^2} = \frac{144}{y^2}$; donc $y = \frac{144}{y^2} \times \frac{36}{16,598}$, d'où $y = \sqrt[3]{\frac{144 \times 36}{16,598}} = 0^m,0678$, et $H - y = 0^m,0522$.

Fig. 558.

XXXVIII

Un triangle équilatéral d'acier, de $0^m,15$ de côté, tourne sur l'un de ses côtés et s'enfonce ainsi complétement dans un bloc de marbre dont la densité est 2,72. L'axe de rotation est normal à la surface du bloc, et le triangle pénètre dans celui-ci par son sommet. On demande la perte de poids que subit le bloc dans cette opération.

Le triangle étant entré dans le bloc comme le montre la figure 559, le volume enlevé est

$V = \pi\,\overline{oi}^2 \times \frac{ab}{2} + \pi\,\overline{oi}^2 \times \frac{ab}{6} = \frac{4}{6}\pi\,\overline{oi}^2 \times ab.$

Mais $\overline{oi}^2 = \overline{ab}^2 - \frac{\overline{ab}^2}{4} = \frac{3}{4}\overline{ab}^2$; donc $V = \frac{\pi\overline{ab}^3}{2} = \frac{3,1416 \times (15)^3}{2} = 5301^{c.cub.},450$. Donc la perte de poids du bloc est $5301^{c.cub.},450 \times 2,72 = 14^{kil},419^{gr},944$.

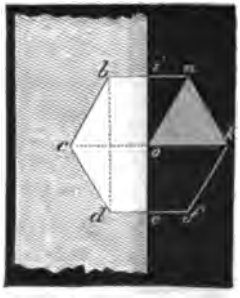


Fig. 559.

XXXIX

On demande le poids d'un bloc de marbre de forme cylindrique de $3^m,75$ de hauteur et de $0^m,85$ de diamètre, la densité du marbre étant 2,72.

$P = 5788^{kil},005^{gr}$.

XL

Un tuyau cylindrique de bronze a $0^m,75$ de long, $0^m,36$ de diamètre à l'intérieur, et ses parois ont $0^m,08$ d'épaisseur. La densité de ce bronze est 8,46. On demande le poids de ce tuyau, 1° quand il est vide, 2° quand il est plein d'eau à 4 degrés.

Soient R le rayon extérieur, r le rayon intérieur, H la hauteur, D la densité ; on a, pour le poids du tuyau vide, $P = \pi HD(R^2 - r^2) = 701^k,657$; et pour son poids quand il est plein, on a $P + \pi r^2 H = 777^k,997$.

XLI

Un morceau de bois, dont la densité est 0,729, a la forme d'un cône droit. On le fait flotter sur l'eau de manière que son axe soit vertical. En mettant d'abord le sommet en bas, puis le sommet en haut, on demande quelle fraction de la hauteur du cône s'enfoncera dans l'eau dans chaque cas.

1° Soient V le volume total du cône, et v le volume de la partie immergée ; soient H et h les hauteurs des deux cônes, D la densité du bois, d celle de l'eau.

Les volumes V et v étant de même poids sont en raison inverse de leurs densités, on a donc $\frac{V}{v} = \frac{d}{D}$, ou $\frac{H^3}{h^3} = \frac{d}{D}$; d'où $h^3 = \frac{H^3 D}{d}$. d étant égal à 1, et faisant aussi $H = 1$, il vient $h = \sqrt[3]{D} = \sqrt[3]{0,729} = 0,9$ de H.

2° Dans la seconde position du cône, on a

$$\frac{V}{V - v} = \frac{d}{D}, \text{ ou } \frac{H^3}{H^3 - h^3} = \frac{d}{D}; \text{ d'où } h^3 = \frac{H^3(d - D)}{d} = 1 - D,$$

en faisant $H = 1$ et $d = 1$. Donc on a $h = \sqrt[3]{1 - 0,729} = 0,647$ de H.

XLII

Un aréomètre de Baumé (pèse-acide), à tige bien cylindrique, s'enfonce jusqu'à la 66e division dans l'acide sulfurique, dont la densité est 1,8. Cela posé, on demande : 1° quelle est la densité de l'eau salée qui sert à la graduation de l'instrument; 2° quel est le rapport du volume d'une division au volume de l'aréomètre jusqu'au zéro.

Fig. 560.

1° Soient V le volume de l'aréomètre jusqu'au zéro de l'échelle, v le volume jusqu'à 66 et v' le volume jusqu'à 15, on a $\frac{V}{v} = \frac{1,8}{1}$, ou $\frac{v + 66}{v} = 1,8$, d'où $v = 82,5$, et $V = 148,5$; de l'égalité $V - v' = 15$, on tire $v' = 133,5$. Donc la densité d de l'eau salée est donnée par l'égalité $\frac{V}{v'} = \frac{d}{1}$, d'où $d = \frac{148,5}{133,5} = 1,112$.

2° Le rapport du volume d'une division au volume de l'aréomètre jusqu'au zéro est $\frac{1}{148,5}$.

XLIII

Un litre d'air, à 0° et à la pression $0^m,76$, pesant $1^gr,293$, on demande ce que pèse, à la même température et à la même pression, un demi-mètre cube de bois dont la densité est 0,5. On demande en outre quel serait le côté d'un cube de laiton, dont la densité est 8,3, et qui, dans l'air, pèserait autant que le demi-mètre cube de bois.

1° Dans le vide, le demi-mètre cube de bois pèserait $500^k \times 0,5 = 250^k$; dans l'air, il pèse donc 250^k moins le poids du demi-mètre cube d'air déplacé, ou

$$250^k - 0^k,646^{gr},5 = 249^k,353^{gr},5.$$

2° Soit x le côté du cube de laiton en décimètres; son volume est x^3, et son poids dans le vide est en kilog. $x^3 \times 8,3$; or, le volume d'air déplacé par le cube est x^3, et le poids de cet air est $1^{gr},293 \times x^3$, donc le poids du cube de laiton, dans l'air, est

$$x^3 \times 8,3 - 0^k,001^{gr},293 \times x^3.$$

On a donc $(8,3 - 0,001293)\, x^3 = 249^k,3535$, d'où $x = 0^m,3407$.

XLIV

On a un cylindre de platine de $0^m,02$ de hauteur; on y adapte un cylindre de fer de même diamètre. Quelle hauteur faut-il donner au cylindre de fer pour que sa base supérieure se maintienne à la surface du mercure, lorsqu'on plonge les deux cylindres dans ce liquide; et si le diamètre des cylindres était $0^m,03$, quel serait le poids du mercure déplacé ? On donne que la densité du platine est 21,59, celle du mercure 13,596, et celle du fer 7,788.

1° Soient D la densité du platine, D′ celle du fer et D″ celle du mercure; soient encore h la hauteur du cylindre de platine et x celle du cylindre de fer.

Le poids du platine est..... $\pi r^2 hD$;
Celui du fer..... $\pi r^2 xD'$;
Et celui du mercure déplacé..... $\pi r^2 (h + x) D''$.

On a donc, en supprimant le facteur commun πr^2,

$$hD + xD' = (h + x)\, D'', \text{ d'où } x = \frac{h\,(D - D'')}{D'' - D'} = \frac{2 \times 7,994}{5,808} = 2^c,75.$$

2° Le diamètre du cylindre étant 3^c, on trouve pour le poids du mercure déplacé

$$\frac{3,1416 \times 9\,(2 + 2,75)\,13,596}{4} = 456^{gr},497.$$

XLV

On suppose qu'un homme soulève à la fois 125 boulets de canon du poids de 2 kilogrammes; on demande quel serait le nombre de boulets pareils qu'il pourrait soulever, en déployant la même force musculaire, si la terre avait le volume de la lune, tout étant égal d'ailleurs. Le rayon de la terre étant pris pour unité, on prendra le rayon de la lune égal à 0,27234, et on ne tiendra pas compte de l'aplatissement de la terre et de la lune à leurs pôles.

Soient R le rayon de la terre et M sa masse; soient de même r et m le rayon et la masse de la lune; soient enfin P le poids porté à la surface de la terre, le rayon étant R, P′ celui qui serait porté si, la masse de la terre restant la même, son rayon était r; et P″ le poids qui serait porté, toujours à la surface de la terre, si, avec le rayon r, elle avait la masse m de la lune.

Les deux poids P et P′ étant, à masse égale, directement proportionnels aux carrés de leurs distances au centre de la terre, on a $\frac{P}{P'} = \frac{R^2}{r^2}$ [1]; au contraire, les poids P′ et P″ étant, à distance égale, en raison inverse des masses, on a $\frac{P'}{P''} = \frac{m}{M}$, ou, ce qui revient au même, à densité égale, $\frac{P'}{P''} = \frac{r^3}{R^3}$ [2]. Multipliant membre à membre les égalités [1] et [2], il vient $\frac{P}{P''} = \frac{r}{R}$; d'où $P'' = P \times \frac{R}{r} = \frac{250^k}{0,27234} = 918^k$, donc le nombre de boulets demandé est $\frac{918}{2} = 459$.

PROBLÈMES SUR LE PRINCIPE D'ARCHIMÈDE, SUR LA DENSITÉ DES GAZ ET SUR LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE.

XLVI

Étant donné un corps A, pesant dans l'air 7gr,55, dans l'eau 5gr,17, et dans un autre liquide B, 6gr,35; de ces données, tirer la densité du corps A et du liquide B.

D'après l'énoncé, le poids du corps A perd dans l'eau 7gr,55 — 5gr,17 = 2gr,38; c'est le poids de l'eau déplacée. Dans le liquide B, il perd 7gr,55 — 6gr,55 = 1gr,20; c'est le poids du liquide B sous le même volume que celui du corps et de l'eau. Par conséquent, le poids spécifique du corps A est $\frac{755}{238} = 3,173$, et celui du liquide B est $\frac{120}{238} = 0,504$.

XLVII

Calculer la valeur numérique de la pression qui s'exerce sur un cercle dont le diamètre est 1m,37, en supposant la hauteur barométrique égale à 0m,76.

Si l'on représente par R le rayon de ce cercle et par S sa surface, on sait, en géométrie, qu'on a $S = \pi R^2$, π étant le rapport de la circonférence au diamètre et égal à 3,141592..... Or, d'après l'énoncé, R étant égal à 68cent.,5, on a $R^2 = 4692$cent.carr.,25, et $\pi R^2 = 14741$ centimètres carrés.

Mais on a vu (137) que le baromètre marquant 0m,76, la pression atmosphérique, sur un centimètre carré, est 1kil,033; sur 14741 centimètres carrés, elle est donc 1kil,033 × 14741, ou 15227kil,6.

XLVIII

On a un aérostat sphérique de 4 mètres de diamètre; on l'emplit d'hydrogène impur qui pèse 100 grammes le mètre cube; le taffetas verni dont est formée l'enveloppe pèse 250 grammes le mètre carré. On demande combien il faut d'hydrogène pour le remplir, et à quel poids il peut faire équilibre, sachant que l'air pèse 1300 grammes le mètre cube.

On sait, en géométrie, que le volume d'une sphère dont le rayon est R, est repré-

senté par $\frac{4\pi R^3}{3}$, et la surface par $4\pi R^2$. Par conséquent, V étant le volume du ballon plein, et S sa surface, on a

$$V = \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{4 \times 3,1416 \times 8}{3} = 33^{\text{m-cub.}},510,$$

$$\text{et } S = 4\pi R^2 = 4 \times 3,1416 \times 4 = 50^{\text{m.car.}},2655.$$

Par conséquent, le poids de l'hydrogène contenu dans le ballon est, d'après l'énoncé, 100 grammes $\times$ 33,510 = 3^k,351; et celui de l'enveloppe égale 250 grammes $\times$ 50,2655 = 12^k,566. Le poids total du ballon, y compris celui de l'hydrogène et de l'enveloppe, est donc 3^k,351 + 12^k,566 = 15^k,917.

Mais le poids de l'air déplacé par le ballon, et, par suite, la poussée de bas en haut (160) est, d'après l'énoncé, 1^k,300 $\times$ 33,510 = 43^k,563. Donc enfin, le poids auquel le ballon peut faire équilibre est 43^k,563 — 15^k,917 = 27^k,646.

XLIX

Pour exploiter une mine de sel gemme, on a percé, dans un terrain salifère, un trou de sonde dans lequel on a introduit un tuyau de 100 mètres de long, qui, ne remplissant pas exactement l'ouverture, dépasse le sol de 1 mètre, et plonge de 0^m,75 dans une dissolution saline dont la densité est 1,3. On verse de l'eau douce entre l'intervalle qui sépare le tuyau des parois du trou de sonde. On demande à quelle hauteur la dissolution s'élèvera dans le tuyau.

Représentons le trou de sonde par AB (fig. 561), par aO le tuyau, et par mn le niveau de la dissolution saline. D'après l'énoncé, CO, portion immergée du tuyau, égale 0^m,75, et la portion ab, hors de l'eau, égale 1 mètre. Par conséquent, la portion aC a une longueur de 98^m,25.

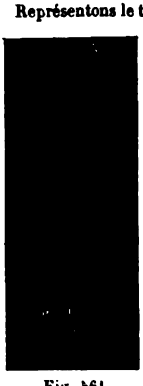


Fig. 561.

Cela posé, admettons que l'eau douce et l'eau salée ne se mélangent pas, et que la dissolution saline, au fond du trou de sonde, conserve toujours le niveau mn. Les deux compartiments aB et aC formant deux vases communiquants, on sait que, dans ces deux vases, les hauteurs des colonnes liquides sont en raison inverse de leurs densités (90). La densité de l'eau douce contenue dans la partie aB étant 1, et la hauteur de la dissolution saline dans le tuyau étant h, on a $\frac{1}{1,3} = \frac{h}{aC}$, mais $aC = 98^m,25$;

donc enfin $$h = \frac{98,25}{1,3} = 75^m,58.$$

L

Un tube reposant sur une cuve à mercure contient une colonne d'air de 1^m,85, à la pression 0^m,75; on demande la pression qu'il faudra exercer sur le mercure pour que la colonne d'air se réduise à 0^m,35 de hauteur.

Le volume d'air, qui était d'abord 1^m,85 à la pression 0^m,75, étant actuellement 0^m,35 à la pression P, et les volumes étant en raison inverse des pressions, on a

$$\frac{1^m,85}{0^m,35} = \frac{P}{0,75}, \text{ d'où } P = 3^m,964.$$

Telle est la force élastique de l'air comprimé, c'est-à-dire la hauteur de la colonne de mercure à laquelle sa tension ferait équilibre. La pression à exercer hors du tube est donc égale à cette pression plus à la hauteur $1^m,50$ dont le mercure s'est élevé dans le tube, c'est-à-dire à $3^m,964 + 1^m,50 = 5^m,464$.

LI

Un ballon pèse $254^{gr},735$ lorsqu'il est vide, et $5^k,422^{gr},737$ lorsqu'il est plein d'air à la température de 4 degrés. On sait qu'à cette température le poids de l'air est à celui de l'eau comme 129 est à 100000; on demande la capacité du ballon. Le même ballon plein d'un autre gaz à 4 degrés pèse $651^{gr},175$, la pression étant $0^m,76$; quel en serait le poids si la pression était $1^m,23$?

1° Le poids de l'air contenu dans le ballon $= 5^k,422^{gr},738 - 254^{gr},735 = 5^k,168^{gr},003$. En représentant par P le poids de l'eau à 4° que peut contenir le ballon, on a donc $\frac{P}{5^k,168003} = \frac{100000}{129}$, d'où $P = 4006^k,204$. Or, le volume d'un kilogramme d'eau à 4° étant un litre, la capacité du ballon est $4006^{lit.},204$.

2° Le poids du gaz contenu dans le ballon à la pression $0^m,76$ étant $651^{gr},175 - 254^{gr},735 = 396^{gr},440$, le poids du même volume, à la pression $0^m,01$, est $\frac{396^m,440}{76}$, et à la pression $1^m,23$, ce poids est $\frac{396,440 \times 123}{76} = 641^{gr},607$.

LII

Un ballon vide pèse $150^{gr}.475$; plein d'air il pèse $160^{gr},158$; plein d'un autre gaz, $162^{gr},235$. 1° La pression étant invariable, on demande la densité de ce gaz par rapport à l'air; 2° quelle correction on aurait eu à faire si la pression avait été $0^m,75$ pendant la pesée de l'air, et $0^m,77$ pendant la pesée du gaz.

1° Poids de l'air $= 160^{gr},158 - 150^{gr}.475 = 9^{gr},683$; poids du gaz $= 162^{gr},235 - 150,475 = 11^{gr},760$; d'où la densité du gaz par rapport à l'air (267) est $\frac{11,760}{9,683} = 1,2145$.

2° La correction à faire est de ramener le poids de l'air et celui du gaz à la pression $0^m,76$. Pour cela, le poids de l'air étant $9^{gr},683$ à la pression $0^m,75$, il est $\frac{9^{gr},683}{75}$ à la pression 1°, et $\frac{9^{gr},683 \times 76}{75}$ à la pression $0^m,76$. On trouvera de même que le poids du gaz à la pression 77 est $\frac{11,760 \times 76}{77}$. Donc la densité cherchée est

$$\frac{11,760 \times 76}{77} : \frac{9,683 \times 76}{75} = \frac{11,760 \times 75}{9,683 \times 77} = 1,183.$$

LIII

Une sphère de platine pèse dans l'air 84^{gr}; dans le mercure elle ne pèse que $22^{gr},6$, quelle est la densité du platine?

Perte de poids dans le mercure $= 84^{gr} - 22^{gr},6 = 61^{gr},4$; d'où la densité du pla-

tine par rapport au mercure égale $\frac{84}{61,4}$, et celle du platine par rapport à l'eau égale $\frac{84 \times 13,6}{61,4} = 18,55$, la densité du mercure étant 13,6.

LIV

On a pesé, à la même température, un fragment de métal successivement dans l'air, dans l'eau et dans un liquide A ; on a trouvé pour son poids dans l'air 5gr,219 ; dans l'eau, 4gr,132 ; dans le liquide, 5gr,009. On demande la densité du métal et celle du liquide A par rapport à l'eau.

Densité du métal = 4,801 ; densité du liquide = 0,193.

LV

Un ballon vide pèse 771gr,177 ; plein d'air, 775gr,228 ; plein d'un autre gaz, 775gr,537. On demande : 1° la densité de ce gaz, les pesées ayant été faites à la pression 0m,76 et à la température 0° ; 2° quelles seraient les corrections à faire si les pesées avaient été faites à la pression 0m,74, et à la température de 15 degrés.

1° Densité du gaz = 1,076 (Voir le prob. LII.)

2° Dans le cas où les pesées seraient faites à la pression 0m,74 et à 15 degrés, il faudrait ramener le poids des deux gaz à la pression 0m,76 et à la température 0° (264, prob. IV), puis diviser le poids du gaz par celui de l'air.

LVI

On fait jouer le piston d'une machine pneumatique ; la capacité du récipient est de 7lit.,53, et il est rempli d'air à la pression 0m,76 et à la température 0°. On demande : 1° le poids de l'air lorsque la pression est réduite à 0m,021 ; 2° le poids de l'air extrait par le piston ; 3° le poids de l'air qui resterait dans la cloche à la température de 15 degrés.

1° A 0° et 0m,76 de pression, 7lit.,53 d'air pèsent 1gr,3 × 7,53 = 9gr,789.

A 0° et 0m,021 de pression, le même volume pèse donc $\frac{9gr,789 \times 21}{760} = 0gr,270$.

2° Le poids de l'air retiré égale 9gr,789 − 0gr,270 = 9gr,519.

3° Le poids de l'air qui resterait, à 15°, serait $\frac{0gr,270}{1 + 0,00366 \times 15} = 0gr,256$ (264, prob. VI).

LVII

On donne un ballon dont le rayon est de 1 mètre ; ce ballon est rempli aux trois quarts de gaz hydrogène ; on demande le poids qu'il pourrait enlever, sachant que la densité de l'hydrogène est 0,069 et qu'un litre d'air pèse 1gr,3. L'air et l'hydrogène sont à la pression 0m,76 et à la température 0 degré.

Volume du ballon = $\frac{4\pi R^3}{3}$, dont les $\frac{3}{4} = \frac{4\pi R^3}{3} \times \frac{3}{4} = \pi R^3 = 3m.cub.,1416$. Un mètre cube d'air pesant 1k,300gr, le poids de l'air déplacé par le ballon est 1k,300 × 3,1416 = 4k,084gr. Quant au poids de l'hydrogène qui remplit le ballon, il est 4k,084 × 0,069 = 0k,281. Donc le poids que le ballon peut enlever, y compris son propre poids, est 4k,084 − 0k,281 = 3k,803gr.

LVIII

Calculer la force ascensionnelle d'un ballon sphérique en taffetas, qui, étant vide, pèse 63k,620, et qui est rempli d'hydrogène impur, sachant que le taffetas verni pèse 0k,250gr le mètre carré, le mètre cube d'air 1k,300gr, et le mètre cube d'hydrogène 0k,100gr.

La surface du ballon $= \frac{63^k,620}{0^k,250} = 254^{m.car.},48$. Or, la surface du ballon étant celle d'une sphère, est égale à $4\pi R^2$; on a donc $4\pi R^2 = 254^{m.car.},48$; d'où

$$R = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{254,48}{3,1416}} = \frac{1}{2}\sqrt{81,0033} = 4^m,50.$$

Par conséquent, en appelant V le volume de la sphère, on a

$$V = \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{4 \times 3,1416 \times (4,5)^3}{3} = 381^{m.cub.},7044.$$

Le poids de l'air déplacé est donc $1^k,3 \times 381,7044 = 496^k,216^{gr}$.

Le poids de l'hydrogène est $0^k,1 \times 381,7044 = 38^k,1704$, donc la force ascensionnelle est $496^k,216 - 38^k,170 - 63^k,620 = 392^k,426^{gr}$.

LIX

Une colonne d'eau de 1m,55 de hauteur, et une colonne d'un autre liquide de 3m,17 de hauteur se font équilibre dans les branches d'un siphon, la température des deux liquides étant 4 degrés; on demande quelle est la densité du second liquide par rapport à l'eau, et quelle serait la hauteur à laquelle il s'élèverait si sa température était portée à 25 degrés, celle de l'eau restant 4°, et le coefficient de dilatation absolue du liquide étant $\frac{1}{6000}$.

1° Les hauteurs des colonnes liquides qui se font équilibre étant en raison inverse des densités (90), on a $1^m,55 \times 1 = 3,17 \times d$, d'où $d = 0,4889$, à 4°.

2° En représentant par h la hauteur du même liquide à 25 degrés, par d sa densité à 4 degrés, et par d' sa densité à 25 degrés, on a $3^m,17 \times d = h \times d'$ [1], or $d' = \frac{d}{1 + \frac{1}{6000} \times 25}$ (252, prob. IV). Portant cette valeur dans l'égalité [1], il vient

$$3^m,17 = \frac{h}{1 + \frac{25}{6000}}, \text{ d'où } h = 3^m,183.$$

LX

La densité de l'air étant 1, celle de l'hydrogène 0,069, et celle de l'acide carbonique 1,524, à 0 degré et à la pression 0m,76, un corps dans l'acide carbonique perd 1gr,15 de son poids, on demande quelle serait sa perte de poids dans l'air et dans l'hydrogène.

On demande encore : 1° si le rapport des pertes de poids reste le même à la température de 200 degrés, la pression ne changeant pas; 2° si ce rapport reste le même à la pression de 30 atmosphères, la température étant 0 degré.

Un litre d'air, à 0° et à la pression 0m76, pesant 1gr,3, un litre d'acide carbonique, dont la densité est 1,524, pèse 1gr,3 × 1,524 = 1gr,9812. On aura donc le volume d'acide carbonique correspondant à 1gr,15, en divisant 1gr,15 par 1gr,9812, ce qui donne pour quotient 0lit.,5804. Or, ce volume étant celui du corps, celui-ci déplace 0lit.,5804 d'air, et, par conséquent, sa perte de poids dans l'air (160) est 1gr,3 × 0,5804 = 0gr.75452 Quant à sa perte de poids dans l'hydrogène, elle est 0gr,75452 × 0,069 = 0gr,052061.

Le rapport des pertes de poids dans l'acide carbonique et dans l'hydrogène ne reste pas rigoureusement le même quand la température ou la pression change, parce que ces deux gaz ne sont pas également dilatables, ni également compressibles (265 et 150).

LXI

Le volume d'air de l'éprouvette d'une machine à compression est de 137 parties. Par le jeu de la machine, ce volume s'est réduit à 25 parties, et le mercure s'est élevé, dans l'éprouvette, à 0m,45; on demande le rapport entre la quantité primitive d'air du récipient et la quantité qui s'y trouve après l'expérience.

L'air de l'éprouvette étant à la pression de 1 atmosphère quand son volume est 137, si l'on représente par F sa tension lorsque le volume s'est réduit de 137 à 25, on a, d'après la loi de Mariotte, F × 25 = 137 × 1, d'où F = 5atm.,48. Quant à la hauteur du mercure dans l'éprouvette, elle équivaut, en atmosphères, à $\frac{45}{76}$ = 0atm.,59. Or, la tension de l'air dans le récipient faisant équilibre à la pression de l'air de l'éprouvette plus à la colonne de mercure qui s'élève dans celle-ci, il faut que cette tension égale 5atm.,48 + 0atm.,59 = 6atm.,07. La pression de l'air dans le récipient étant devenue 6,07 fois plus grande, il en est de même de la masse de l'air, donc le rapport demandé est $\frac{1}{6,07}$.

LXII

Un corps perd de son poids dans l'air 7 grammes; combien perdrait-il dans l'acide carbonique et dans l'hydrogène, sachant que la densité de l'acide carbonique est 1,524, et celle de l'hydrogène 0,069?

Le corps perdant 7 grammes de son poids dans l'air, perd, dans un gaz deux, trois fois plus dense, deux, trois fois davantage; donc, dans l'acide carbonique, il perd 7gr × 1,724 = 10gr,668, et dans l'hydrogène 7gr × 0,069 = 0gr,483.

LXIII

Combien pèse, à 0 degré et à la pression 0m,76, l'hydrogène contenu dans un ballon sphérique dont la surface a 10 mètres carrés? On sait que la pesanteur spécifique de l'hydrogène, rapportée à celle de l'air, est de 0,0692, et que celle de l'air lui-même, rapportée à l'eau, est $\frac{1}{770}$.

Combien pèserait le même volume d'hydrogène s'il était mesuré à la température de 15° et à la pression 0m,77? (On suppose connu le coefficient de dilatation des gaz.)

Surface du ballon = $4\pi R^2$ = 10m.car., d'où R = $\sqrt{\frac{10}{4\pi}}$ = $\sqrt{0\text{m.car.},795772}$ = 0m,892. En représentant par V le volume du ballon, on a donc

$$V = \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{4 \times 3,1416 \times (0,892)^3}{3} = 2972\text{lit.},330.$$

Si le ballon était plein d'eau, son poids serait donc 2972k320gr; plein d'air, qui pèse 770 fois moins, son poids serait $\frac{2972^k,330}{770}$; donc enfin, plein d'hydrogène, dont la densité par rapport à l'air est 0,0692, son poids est

$$\frac{2972^k,330 \times 0,0692}{770} = 0^k,267^{gr},13.$$

Pour obtenir le poids du même volume d'hydrogène à 15°, il faut observer que la densité de ce gaz, qui est 0,0692 à la température zéro, est $\frac{0,0692}{1 + 0,003668 \times 15}$ à 15° (252, pr. IV), le coefficient de dilatation de l'hydrogène étant 0,003668. Par conséquent, le poids de l'hydrogène à 15° est $\frac{2972^k,330 \times 0,0692}{770\,(1 + 0,003668 \times 15)}$.

LXIV

Trouver la valeur numérique de la pression qu'exerce l'atmosphère sur un rectangle dont un côté est égal à 0m,26, et la diagonale à 0m,44. On suppose que la hauteur du baromètre est 0m,76, et la température zéro.

L'aire du rectangle en centimètres carrés est 920c.car.,4, et comme on sait que la pression atmosphérique, sur un centimètre carré, est 1k,033gr, la pression demandée est $1^k,033 \times 920,4 = 950^k,773^{gr}$.

LXV

Un ballon de verre renferme 8gr,548 d'air; on le remplit de protoxyde d'azote dont la densité est 1,52, celle de l'air étant 1; on demande quel sera le poids du protoxyde: 1° si la pression est la même dans les deux cas; 2° si la pression de l'air est 0,76 et celle du protoxyde est 0,78. On suppose que la température ne varie pas.

1° Le poids du protoxyde d'azote est $8^{gr},548 \times 1,52 = 12^{gr},993$.

2° A la pression 0,78, son poids est $\frac{12,993 \times 78}{76} = 13.334$.

LXVI

Un ballon de verre pèse, étant vide, 152gr,475; plein d'air, il pèse 168gr,386, et plein d'un autre gaz, 157gr,235. On demande la densité de ce gaz, rapportée à celle de l'air prise pour unité, dans le cas où la pression reste invariable. On demande aussi quel genre de correction il faudrait faire si la pression avait été de 0m,77 pendant la pesée de l'air, et de 0m,74 pendant la pesée du gaz.

Dans le premier cas, la densité du gaz est $\frac{157,235 - 152,475}{168,386 - 152,475} = 0,299$.

Dans le second, elle est $\frac{0,299 \times 77}{74} = 0,311$.

LXVII

Dans un récipient de 3 litres on fait entrer: 1° 2 litres d'hydrogène à la pression de 5 atmosphères; 2° 4 litres d'acide carbonique à la pression de 4 atmosphères; 3° 3 litres

d'azote à la pression de $\frac{1}{2}$ atmosphère. On demande la pression finale du mélange, la température étant supposée constante pendant l'expérience.

La pression $= \frac{5 \times 2}{3} + \frac{4 \times 4}{3} + \frac{3}{2 \times 3} = 9^{atm.} + \frac{1}{6}$.

LXVIII

La cloche d'une machine pneumatique renferme $3^{lit.},17$ d'air; un baromètre communiquant avec la partie supérieure de la cloche, marque zéro quand celle-ci est en communication avec l'atmosphère. On ferme la cloche et on fait jouer la machine; le mercure s'élève alors dans le baromètre de $0^m,65$. Un second baromètre placé près de la machine a marqué $0^m,76$ pendant toute l'expérience. On demande le poids de l'air qu'on a retiré de la cloche et le poids de celui qui reste, la température étant zéro.

Fig. 562.

A 0° et à la pression $0^m,76$, le poids de l'air contenu dans la cloche est

$$1^{gr},3 \times 3,17 = 4^{gr},121.$$

A 0° et à la pression $76 - 65 = 11$, le poids de l'air qui reste encore dans la cloche est $\frac{1^{gr},3 \times 317 \times 11}{76} = 0^{gr},596$.

Donc le poids de l'air retiré de la cloche est $4^{gr},121 - 0^{gr},596 = 3^{gr},525$.

LXIX

Le volume d'air, dans l'éprouvette d'une machine de compression, est égal à 152 parties. Par le jeu de la machine, ce volume est réduit à 37 parties, et le mercure s'est élevé, dans le tube manométrique, à $0^m,48$. On demande dans quel rapport s'est accrue la quantité d'air dans le récipient de la machine.

Fig. 563.

Dans la figure ci-contre, on a AB = 152 parties, AC = 37 parties, et BC = $0^m,48$. Cela posé, la pression de l'air en AC est donc, d'après la loi de Mariotte, $\frac{152}{37} = 4^{atm.},108 = 3^m,122$, puisqu'une atmosphère est représentée par $0^m,76$. La pression dans le récipient M, où l'on comprime l'air, est donc $3^m,122 + 0^m,48 = 3^m,602$. Or, la masse de l'air ayant augmenté comme la pression, elle est actuellement, dans le récipient, $\frac{3^m,602}{0,76} = 4,7$. C'est-à-dire qu'elle est devenue 4 fois $\frac{7}{10}$ plus grande.

LXX

Sachant que la capacité du corps de pompe d'une machine pneumatique est $\frac{1}{3}$ de la capacité du récipient, calculer après combien de coups de piston la pression intérieure sera la deux-centième partie de ce qu'elle était primitivement.

Représentons par 1 la pression atmosphérique, et par 1 le volume du récipient. Après l'ascension du piston, ce volume sera $1 + \frac{1}{3}$, et par conséquent la pression de l'air sous le récipient sera $\frac{1}{1 + \frac{1}{3}}$, puisqu'elle est en raison inverse du volume. De même, au second coup de piston, elle est $\frac{1}{1 + \frac{1}{3}}$ de ce qu'elle était après le premier; c'est-à-dire $\frac{1}{1 + \frac{1}{3}}$ de $\frac{1}{1 + \frac{1}{3}}$ ou $\frac{1}{\left(1 + \frac{1}{3}\right)^2}$.

On trouvera ainsi qu'après n coups de piston, la pression est $\frac{1}{\left(1 + \frac{1}{3}\right)^n}$.

On a donc $\frac{1}{\left(1 + \frac{1}{3}\right)^n} = \frac{1}{200}$, d'où $\left(1 + \frac{1}{3}\right)^n = 200$; ou $\left(\frac{4}{3}\right)^n = 200$.

Prenant les logarithmes, il vient $n = \frac{\log 200}{\log 4 - \log 3} = 18,4$.

LXXI

Un manomètre à air comprimé est divisé en 110 parties d'égale capacité : quand la pression extérieure est de 0^m76, le mercure, dans l'intérieur du tube et dans la cuvette, se tient au zéro de l'échelle. On porte le manomètre sous le récipient d'une machine à comprimer l'air et on voit le mercure s'élever jusqu'à la 80me division; mesurant alors la hauteur du mercure dans le tube, on la trouve de $0^m,45$; on demande la pression dans la machine.

Fig. 564.

Soit P la pression de l'air en AB (fig. 564); la portion de l'échelle correspondante à AB étant 30, on a $\frac{P}{76} = \frac{110}{30}$, d'où $P = 2^m,787$. En y ajoutant la hauteur $0^m,450$ du mercure dans le tube, la pression totale est $3^m,237$.

Pour la réduire en atmosphères, il n'y a qu'à diviser $3^m,237$ par $0^m,76$, ce qui donne $4^{atm.} + \frac{1}{4}$.

PROBLÈMES SUR LES COEFFICIENTS DE DILATATION.

LXXII

Les hauteurs de deux baromètres A et B ont été observées, l'une à — 10 degrés, l'autre à + 15; on demande quelle correction il faut leur faire subir pour les ramener l'une et l'autre à ce qu'elles eussent été à la température de zéro, sachant que le coefficient de dilatation cubique du mercure est $\frac{1}{5550}$. On supposera A haut de 737 millimètres, et B de 763.

Cette question se résout au moyen de la formule $H = h(1 + Dt)$ (261), en prenant t avec le signe + pour les températures au dessus de zéro, et avec le signe — pour les températures au-dessous. De cette formule, on tire $h = \frac{H}{1 + Dt}$. Celle-ci donne, pour le baromètre A, $h = 737 \times \frac{5550}{5550 - 10} = 738^{mm},3$; et pour le baromètre B, $h = 763 \times \frac{5550}{5550 + 15} = 760^{mm},9$.

LXXIII

On a une barre de 3 mètres d'un métal qui a pour coefficient de dilatation $\frac{1}{754}$; une autre barre de 5 mètres, d'un autre métal, se dilate pour un même nombre de degrés, autant que la première; en trouver le coefficient de dilatation.

Soit K le coefficient de dilatation de cette seconde barre, son allongement total pour un degré, sera $5 \times K$ (248), et celui de la première barre $3 \times \frac{1}{754}$; on a donc

$$5 \times K = 3 \times \frac{1}{754}, \text{ d'où } K = \frac{3}{3770}.$$

LXXIV

On a un carré de tôle de 3 mètres de côté, à zéro, on en porte la température à 64 degrés. Calculer ce que deviendra sa surface, en sachant que le coefficient de dilatation du fer est 0,0000122.

En représentant par l le côté donné à zéro, par l' le même côté à t degrés, et par k le coefficient de dilatation du fer, on a la formule connue (251) : $l' = l(1 + kt)$, à l'aide de laquelle on trouve le côté l' à 64 degrés, en y faisant $l = 3$, $t = 64$, et $k = 0,0000122$, ce qui donne

$$l' = 3(1 + 0,0000122 \times 64) = 3^{m},0023424.$$

Cela posé, la surface d'un carré étant égale au produit de son côté par lui-même, la surface cherchée égale $(3^{m},0023424)^2 = 9^{mc}, 01^{dc}, 41^{cc}$.

LXXV

On veut faire avec de l'acier et du laiton un pendule compensateur dont la longueur constante sera de $0^{m},50$. On sait que le coefficient de dilatation de l'acier employé à

cet usage est de 0,000010788, et celui du laiton de 0,000018782. On demande quelle disposition on devra donner à ce pendule et quelles devront être les longueurs des barres d'acier et de laiton pour que la compensation ait lieu.

Pour satisfaire aux conditions de ce problème, il faut : 1° que la tige du pendule soit formée d'un système de barres de laiton et d'acier, disposées de manière que leur dilatation se produise en sens contraire; 2° que les longueurs respectives du laiton et de l'acier soient en raison inverse de leurs coefficients de dilatation (254). On satisfait à ces conditions en disposant le pendule comme on l'a déjà vu (fig. 167).

En représentant par x la longueur totale des barres d'acier, et par y celle des barres de laiton, on aura, d'après l'équation [1] du paragraphe 254, $x - y = 50^c$ [1].

De plus, les longueurs x et y devant être en raison inverse des coefficients on a

$$\frac{x}{y} = \frac{18762}{10788} \text{ [2].}$$

Résolvant les équations [1] et [2], on trouve $x = 1^m,1747$, et $y = 0^m,6747$.

LXXVI

Un vase sphérique d'un rayon intérieur égal à $\frac{2}{3}$ de mètre, à 0 degré, est formé d'une matière dont le coefficient de dilatation linéaire égale $\frac{1}{2500}$, on demande combien de kilogrammes de mercure ce vase renferme : 1° à 0 degré; 2° à 25 degrés?

Soient R le rayon du vase, V son volume à zéro, V' son volume à t, et K son coefficient de dilatation linéaire, le rayon, à t, sera $R(1 + Kt)$ (254), et on aura $V = \frac{4\pi R^3}{3}$, et $V' = \frac{4\pi R^3(1 + Kt)^3}{3}$; d'où $V' = \frac{4\pi R^3(1 + 3Kt + 3K^2t^2 + K^3t^3)}{3}$.

Or, K étant égal à $\frac{1}{2500}$, les termes qui contiennent K^2 et K^3 sont assez petits pour être négligés, ce qui donne $V' = \frac{4\pi R^3(1 + 3Kt)}{3}$.

Remplaçant R, K et t par leurs valeurs, il vient

$$V = 1241^{lit.},11 \text{ et } V' = 1278^{lit.},333.$$

La densité du mercure à 0° étant 13,596, celle du même corps à 25° est $\frac{13,596}{1 + \frac{1}{5550} \times 25} = 13,535$ (252). Donc le poids de mercure à 0° est $1241^{lit.},11 \times 13,596 = 16863^k,996$, et le poids à 25° est $1278,333 \times 13,535 = 17302^k,237^{gr}$.

LXXVII

Un vase sphérique de $0^m,25$ de diamètre est rempli de gaz hydrogène à la température de 35 degrés à la pression de $0^m,78$. On demande le poids du gaz, et quel en serait le volume si la température tombait à 5 degrés au-dessous de zéro, et la pression atmosphérique à $0^m,74$.

Le volume du vase $= \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{4 \times 3,1416 \times (0^m,125)^3}{3} = 8^{lit.},18125$. Or, $1^{lit.}$ d'air à 0° et la pression à $0^m,76$ pèse $1^{gr},3$; par conséquent, $1^{lit.}$ d'hydrogène, à la même température et à la même pression, pèse $1^{gr},3$ multiplié par la densité de l'hydrogène, c'est-à-dire $1^{gr},3 \times 0,0692$. A la pression de $0^m,78$, le poids d'un litre d'hy-

drogène est donc $\frac{1^{gr},3 \times 0,0692 \times 78}{76}$; enfin, à cette dernière pression et à 35°, son poids est $\frac{1^{gr},3 \times 0,0692 \times 78}{76\,(1 + 0,003668 \times 35)}$ (269, pr. VI); donc le poids de l'hydrogène contenu dans le vase est $\frac{1^{gr},3 \times 0,0692 \times 78 \times 8^{lit.},181}{76\,(1 + 0,003668 \times 35)} = 0^{gr},6686$.

Pour passer du volume à 35° au volume à — 5°, on fera usage de la formule $V' = \frac{V(1 + at')}{1 + at}$ (264, pr. III), en y prenant t' avec le signe — ; on trouve ainsi que le volume, à — 5° et à la pression $0^m,74$, est $\frac{8^{lit.},181\ (1 - 0,003668 \times 5)\ 78}{(1 + 0,003668 \times 35)\ 74}$.

LXXVIII

Une barre formée d'un métal dont le coefficient de dilatation linéaire est $\frac{1}{754}$ a 2^m de longueur. On demande quelle longueur on devrait donner à une barre d'un autre métal, dont le coefficient de dilatation est $\frac{1}{1150}$, pour que sa dilatation totale, pour 1 degré, soit égale à celle de la première barre.

En représentant par l la longueur cherchée, on a $l \times \frac{1}{1150} = 2 \times \frac{1}{754}$, d'où $l = 3^m,050$.

LXXIX

Une barre de 7^m, formée d'un métal dont le coefficient de dilatation est $\frac{1}{735}$, se dilate autant qu'une autre barre de 9^m d'un autre métal. On demande le coefficient de dilatation de ce dernier métal.

Soit K ce coefficient de dilatation, on a $K \times 9 = 7 \times \frac{1}{735}$, d'où $K = \frac{1}{945}$.

LXXX

Le poids de l'atmosphère fait monter le mercure à $0^m,76$ dans le baromètre, à la température 0 degré; on demande : 1° à quelle hauteur s'élèverait le mercure si la température était de 25°, le coefficient de dilatation du mercure étant $\frac{1}{5550}$. 2° A quelle hauteur s'élèverait, à 0°, l'alcool dont la densité est 0,79. On sait que la densité du mercure est 13,6.

1° En représentant par H la hauteur du baromètre à 25° et par h sa hauteur à zéro, la formule $H = h\left(1 + \frac{t}{5550}\right)$ (261) donne $H = 76\left(1 + \frac{25}{5550}\right) = 76^c,34$.

2° Les hauteurs de mercure et d'alcool qui font équilibre à la pression atmosphérique étant en raison inverse de leur densité, si l'on représente par h' la hauteur de l'alcool, on a

$$h' \times 0,79 = 76 \times 13,6\,; \qquad \text{d'où } h' = \frac{76 \times 13,6}{0,79} = 13^m,0835.$$

LXXXI

Un ballon vide pèse 137gr,435 ; plein d'air, il pèse 145gr,237 ; plein d'un autre gaz, 152gr,118. On demande : 1° la densité du gaz par rapport à l'air, lorsque la pression et la température sont restées invariables ; 2° la même densité dans le cas où la pression aurait été de 75 centimètres pendant la pesée de l'air, et de 77 centimètres pendant la pesée de l'autre gaz ; 3° quel genre de correction aurait-il fallu faire, si la température avait été de 8 degrés pendant la pesée de l'air, et de 11 degrés pendant celle du gaz.

1° 145,237 — 137, 435 = 7gr,802 ; 152,118 — 137,435 = 14gr,683 ; densité du gaz $= \frac{14,683}{7,802} = 1,8806$.

2° Le poids de l'air à 75c de pression étant 7gr,802, à la pression 76c il est $\frac{7,802 \times 76}{75}$; celui du gaz, à la pression 76, est $\frac{14,683 \times 76}{77}$; donc la densité du gaz, dans le second cas, est $\frac{14,683 \times 75}{7,802 \times 77} = 1,8337$.

3° Il faudrait ramener le poids des deux gaz à zéro, en multipliant le poids de l'air par $1 + 0,00366 \times 8$, et celui du gaz par $1 + 0,00366 \times 11$.

LXXXII

La dilatation du fer pour chaque degré d'élévation de température étant de 0,0000122 de la longueur mesurée à zéro, quelle sera, à 60 degrés, la surface d'un disque circulaire de tôle qui, à zéro, a 2m,75 de diamètre ?

$$S = \pi R^2 (1 + kt)^2 = 3,1416 \times (1^m,375)^2 (1 + 0,0000122 \times 60)^2 =$$
$$5^{m.car.},94^{d.car.},83^{c.car.}$$

LXXXIII

Un ballon de verre pèse, étant vide, 263gr,525 ; plein d'air, à la température de 4° et à la pression 0m,76, il pèse 375gr,826 ; quelle est sa capacité ? Le même ballon plein d'un gaz à 4° pèse 293gr,687, la pression étant 0m,81 ; quel est le poids d'un litre de ce gaz, à 4° et à la pression 0m,76 ?

1° Le poids de l'air contenu dans le ballon, à 4°, est

$$375^{gr},826 - 263^{gr},525 = 112^{gr},301.$$

Or, à 4°, 1 litre d'air pèse

$$\frac{1^{gr},3}{1 + 0,00366 \times 4} = \frac{1^{gr},3}{1,01464}.$$

Donc le volume du ballon, à 4°, est

$$112,301 : \frac{1,3}{1,01464} = 87^{lit.},650.$$

2° A 4° et à la pression $0^m,81$, le poids d'un litre du gaz est

$$\frac{293^{gr},687 - 263^{gr},525}{87,650} = \frac{30^{gr},162}{87,650}$$

donc, à la pression $0^m,76$, il est $\frac{30,162}{87,640} \times \frac{76}{81} = 0^{gr},322$.

LXXXIV

On donne une barre de plomb qui se dilate autant qu'une barre d'acier de 3 mètres de longueur; on sait que le coefficient de dilatation du plomb est $\frac{1}{351}$, celui de l'acier $\frac{1}{327}$; quelle est la longueur de la barre de plomb?

$$l = 3^m,220.$$

LXXXV

A quelle température un litre d'air sec pèse-t-il 1 gramme, sous la pression $0^m,77$, le coefficient de dilatation de l'air étant 0,00366, et le poids d'un litre d'air sec, à 0° et à la pression $0^m,76$, étant $1^{gr},299$?

On a $\frac{1,299 \times 77}{(1 + 0,00366 \times t)\,76} = 1^{gr}$, d'où $t = 86°$.

LXXXVI

Le poids spécifique du mercure étant 13,59 à zéro, on demande quel est, à 85°, le volume de 30 kilogr. de ce métal. On prendra pour coefficient de dilatation du mercure $\frac{1}{5550}$.

Le volume à zéro est $\frac{P}{D} = \frac{30}{13,59}$; d'où le volume à 85° est

$$\frac{30}{13,59}\left(1 + \frac{1}{5550} \times 85\right) = 2^{lit.},241.$$

LXXXVII

Le rapport entre le poids spécifique du cuivre à zéro, et celui de l'eau à 4° est 8,88. Le coefficient de dilatation cubique du cuivre est $\frac{1}{58200}$, et la fraction qui représente la dilatation totale de l'eau, entre 4 et 15 degrés, est $\frac{1}{1360}$. Cela posé, on demande quel est, à 15 degrés, le rapport des poids spécifiques de ces deux corps.

L'eau pesant 1 à 4°, à 15° elle pèse $\frac{1}{1 + \frac{11}{1360}}$ (252, pr. IV).

A zéro le cuivre pèse 8,88, à 15° il pèse $\frac{8,88}{1+\frac{15}{58200}}$. Donc le poids spécifique du cuivre à 15° est

$$\frac{88,8}{1+\frac{15}{58200}} : \frac{1}{1+\frac{11}{1360}} = \frac{8,88 \times 58200}{58215} \times \frac{1371}{1360} = 8,94.$$

LXXXVIII

On a deux thermomètres à mercure construits avec le même verre, l'un a une boule dont le diamètre intérieur est $0^m,0075$, et un tube dont le diamètre intérieur est $0^m,0025$; l'autre a une boule de $0^m,0062$ de diamètre, et un tube de $0^m,0015$ de diamètre intérieur. On demande quel est le rapport de longueur d'un degré du premier thermomètre à un degré du second.

Soient A et B les deux thermomètres donnés, D et D′ les diamètres des boules, d et d' les diamètres des tubes. Si l'on conçoit un troisième thermomètre C qui ait la même boule que B et le même tube que A, et si l'on représente par l, l', l'' les longueurs respectives d'un degré dans les trois thermomètres, on a les proportions

$$\frac{l}{l''} = \frac{D^3}{D'^3}, \qquad \text{et } \frac{l''}{l'} = \frac{d'^2}{d^2};$$

les multipliant membre à membre, il vient

$$\frac{l}{l'} = \frac{D^3 d'^2}{D'^3 d^2}.$$

En substituant aux lettres leurs valeurs, on trouve

$$\frac{l}{l'} = \frac{421875 \times 225}{238328 \times 625} = 0,63.$$

PROBLÈMES SUR LES CALORIQUE SPÉCIFIQUE.

LXXXIX

Dans $25^k,45$ d'eau à 12°,5, on met $6^k,17$ d'un corps à la température de 80 degrés : le mélange prend une température de 14°,17; on demande quelle est la chaleur spécifique de ce corps.

En représentant par c le calorique spécifique demandé, on a (328),

$$6^k,17\ (80 - 14,17)\ c = 25^k,45\ (14,17 - 12,5)\ ; \text{ d'où } c = 0,104.$$

XC

La capacité de l'or pour la chaleur est de 0,0298, celle de l'eau étant prise pour unité; on demande combien il faudra de ce métal à 45 degrés pour élever de 12°, 3 à 15°,7, la température de $1^k,000^{gr},58$ d'eau.

Soit x le poids cherché, en kilogrammes; d'après la formule connue $m\ (t' - t)\ c$ (327), la chaleur cédée par l'or, en se refroidissant de 45 degrés à 15°,7, est $x\ (45 - 15,7)\ 0,0298$, et celle absorbée par l'eau, en s'échauffant de 12°,3 à 15°,7,

est $1^k,00058$ (15,7 — 12,3). Or, la quantité de chaleur cédée par l'or étant nécessairement égale à celle qui est absorbée par l'eau, on a

$$x\,(45 - 15,7)\,0,0298 = 1^k,00058\,(15,7 - 12,3), \qquad \text{d'où } x = 3^k,896.$$

XCI

On a une sphère de platine de $0^m,05$ de rayon à 95 degrés, on la plonge dans 2 litres d'eau à 4 degrés; on demande la température de l'eau lorsque l'équilibre s'est établi. La capacité calorifique du platine est 0,0324; son coefficient de dilatation est 0,000008842, et sa densité 22,07.

Soient V' le volume de la sphère à 95 degrés, et V le volume à zéro; on a

$$V' = V\,(1 + Kt), \qquad \text{d'où } V = \frac{V'}{1 + Kt}.$$

$$\text{Or, } V' = \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{4 \times 3,141592 \times 125^{\text{cent.cub.}}}{3} = 523^{\text{cent.cub.}},598;$$

$$\text{d'où } V = \frac{523,598}{1 + 0,000008842 \times 95} = 523^{\text{cent cub.}},158.$$

Le poids de la sphère de platine est donc

$$P = 523^{\text{cent.cub.}},158 \times 22,07 = 11^k,546^{gr}.$$

Par conséquent, la masse de platine, en se refroidissant de 95 à x degrés, cède, d'après la formule $m\,(t' - t)\,c$ (327), une quantité de chaleur égale à $11^k,546 \times (95 - x) \times 0,0324$, et les deux litres d'eau, en s'échauffant de 4 à x degrés, absorbent $2 \times (x - 4)$.

On a donc $2\,(x - 4) = 11,546 \times 0,0324\,(95 - x)$; d'où $x = 18^o,3$.

XCII

Un ballon sphérique de $0^m,14$ de rayon, est plein de mercure à 70 degrés; on verse le mercure dans de l'eau à 4 degrés, qui remplit, à moitié, un vase cylindrique de $0^m,40$ de hauteur et $0^m,20$ de rayon. On sait que la capacité du mercure pour la chaleur est de 0,0330. On demande quelle sera la température du mélange, en négligeant la température des parois du vase.

Soient V le volume du ballon, et R son rayon; on sait qu'en géométrie on a, pour le volume de la sphère, $V = \frac{4\pi R^3}{3}$. On aura donc, d'après les données du problème,

$$V = \frac{4 \times 3,1416 \times 2^{\text{déc.cub.}},744}{3} = 11^{\text{déc.cub.}},494.$$ Or, si l'on prend pour densité du mercure 13,6, on aura sa densité à 70 degrés par la formule $d' = \frac{d}{1 + Dt}$ (252), qui donne $d' = \frac{13,6}{1 + \frac{70}{5550}} = 13,4306$.

Par conséquent, le poids du mercure contenu dans le ballon est

$$11^{\text{déc.cub.}},494 \times 13,4306 = 154^k,371^{gr}.$$

Le demi-volume du cylindre égale

$$\frac{\pi R^2 H}{2} = \frac{3,141592 \times 4 \times 4}{2} = 25^{\text{déc. cub.}},133,$$

et le poids de l'eau qu'il contient est $25^k,133^{gr}$.

Cela posé, si l'on représente par θ la température du mélange, l'eau a absorbé une quantité de chaleur représentée par $25^k,133\ (\theta - 4)$, et celle que le mercure a cédée l'est par $154,371 \times 0,033\ (79 - \theta)$, d'après les formules données au paragraphe 327. On a donc l'équation

$$154,371 \times 0,033\ (70 - \theta) = 25,133\ (\theta - 4);$$

d'où l'on tire $\theta = 15^\circ,12$.

XCIII

Calculer la puissance calorifique du stère de bois qui pèse 400 kilogrammes, et qui se compose d'un mélange de bois de chêne et de bois de sapin, sachant que le chêne pèse 450 kilogrammes le mètre cube, et le sapin 325 kilogrammes; et que la quantité d'eau dont la température est élevée de 0 degré à 100 degrés par la combustion d'un mètre cube de bois, est de 12150^k pour le chêne, et de 8775^k pour le sapin.

Soient x le volume du chêne qui entre dans le stère, et y le volume du sapin, on a $x + y = 1$ [1].

Un mètre cube de chêne pesant 450^k, le volume x pèse $450\,x$; de même le volume y de sapin pèse $325\,y$; on a donc $450\,x + 325\,y = 400$ [2].

Résolvant les équations [1] et [2], on trouve $x = \frac{3}{5}$ et $y = \frac{2}{5}$.

Or, la puissance calorifique d'un mètre cube de chêne étant 12150, celle du volume x est $12150 \times \frac{3}{5}$, de même celle de y est $8775 \times \frac{2}{5}$; donc la puissance calorifique demandée est $\frac{12150 \times 3 + 8775 \times 2}{5} = 10800$.

XCIV

Un vase métallique qui pèse 350 grammes, renferme $32^{kil},50$ d'eau à $14^\circ,5$; la chaleur spécifique du métal est 0,12, celle de l'eau étant 1; on met dans l'eau de ce vase $8^k,25$ d'un autre métal à $60^\circ,5$, la température de l'eau s'élève à $15^\circ,4$, on demande la chaleur spécifique du dernier métal.

On a, d'après une formule connue (328), $c = \frac{(m + m'c')(\theta - t)}{M\,(T - \theta)}$, d'où remplaçant, $c = \frac{(32^k,5 + 0^k,35 \times 0,12)(15^\circ,4 - 14^\circ,5)}{8^k,25\ (60^\circ,5 - 15^\circ,4)} = 0,0787$.

PROBLÈMES SUR LES CALORIQUES LATENTS.

XCV

Combien faudrait-il de kilogrammes de glace à zéro pour amener à 10 degrés centigrades l'eau contenue dans un bassin à bord circulaire et à fond horizontal, dont la circonférence supérieure serait de $8^m,30$, la circonférence inférieure de $6^m,15$, et la hauteur de $1^m,76$; ce bassin étant rempli d'eau à moitié de sa hauteur, et la température de l'eau du bassin étant de 30 degrés.

Soient R le rayon OB (fig. 565) de la base supérieure, r le rayon CD de la base inférieure, r' le rayon moyen IE, et h la hauteur IC du liquide contenu dans le bassin. D'après l'énoncé, on a

Fig. 565.

$$R = \frac{8,30}{2\pi} = 1^m,3210,\ r = \frac{6,15}{2\pi} = 0^m,9788,\ IC = 0^m,83,$$

$$\text{et } r' = \frac{R + r}{2} = 1^m,1499.$$

Cela posé, le volume V du liquide étant celui d'un tronc de cône dont la hauteur est h, et dont les rayons des bases sont r et r', on a, d'après un théorème connu de géométrie, $V = \frac{\pi h}{3}(r'^2 + r^2 + rr')$; d'où, remplaçant les lettres par leur valeur, il vient

$$V = \frac{3,1416 \times 0,83}{3}[(1,1499)^2 + (0,9788)^2 + 1,1499 \times 0,9788].$$

Effectuant les calculs, on trouve $V = 3^{m.cub.},138,583$, volume qui représente un poids d'eau de $3138^k,583^{gr}$.

Soit actuellement x le poids de glace nécessaire pour refroidir cette masse d'eau de 30 à 10 degrés. Comme on a vu (336) qu'en se fondant, 1 kilogramme de glace absorbe 79 unités de chaleur, x kilogrammes de glace absorbent $79x$, pour donner x kilogrammes d'eau à zéro. Or, d'après les données de la question, cette dernière masse devant elle-même se trouver portée à 10 degrés, elle absorbe, en outre, une quantité de chaleur égale à $10\,x$ (327). D'un autre côté, la chaleur cédée par l'eau est égale à $3138^k,583 \times (30 - 10)$, ou 62771,6. On a donc l'égalité

$$79\,x + 10\,x = 62771,6, \qquad \text{d'où } x = 705^k,300.$$

XCVI

Chercher combien il faut de kilogrammes de vapeur d'eau pour porter un bain de 246 kilogrammes d'eau, de 13 à 28 degrés, sachant que la chaleur latente de la vapeur d'eau est 540.

Soit x le poids de vapeur demandé ; 1 kilogramme de vapeur qui se condense pour donner 1 kilogramme d'eau à 100 degrés, cédant 540 unités de chaleur, x kilogrammes de vapeur cèdent $540 \times x$; de plus, les x kilogrammes d'eau formés, se refroidissant ensuite de 100 degrés à 28, cèdent eux-mêmes un nombre d'unités représenté par $(100 - 28)\,x$ (327). Or, les 246 kilogrammes d'eau qui constituent le bain dans lequel la vapeur se condense, s'échauffant alors de 13 à 28 degrés, absorbent une quantité de chaleur égale à $246\,(28 - 13)$. On a donc l'équation

$$540\,x + (100 - 28)\,x = 246\,(28 - 13), \text{ ou } (540 + 72)\,x = 246 \times 15;$$

$$\text{d'où } x = 6^{kil},029^{gr}.$$

XCVII

Trouver combien il faut de kilogrammes de vapeur d'eau à 100 degrés pour élever 20 kilogrammes d'eau de zéro à 90 degrés.

Soit x le nombre de kilogrammes demandé, le calorique latent de la vapeur d'eau étant 540 (337), x kilogrammes de vapeur, en se condensant pour donner x kilogrammes d'eau à 100°, fournissent $540x$ unités de chaleur (327), et x kilogrammes d'eau

en se refroidissant de 100° à 90°, donnent $10x$ unités ; or, 20^k d'eau, en s'échauffant de 0° à 90°, absorbent 20×90 unités. On a donc $540\,x + 10\,x = 20 \times 90$, d'où $x = 3^k,272^{gr}$.

XCVIII

On plonge une sphère de glace de 134 millimètres de rayon dans un bain de 20 litres d'eau à 80 degrés ; on demande la température du bain après la fusion de la glace (sans tenir compte de la densité de l'eau à 4° et à 80°), sachant que le calorique latent de la glace est 79.

En représentant par V le volume de la sphère et par R son rayon, on a

$$V = \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{4 \times 3,1416 \times (0^m,134)^3}{3} = 10^{déc.cub.},078688.$$

La densité de la glace étant 0,93 (107), le poids de la sphère est

$$10,078688 \times 0,93 = 9^k,373.$$

En appelant θ la température du bain, après la fusion, on a donc (338)

$$20\,(80° - \theta) = 79 \times 9,373 + 9,373\,\theta, \qquad \text{d'où } \theta = 29°,26.$$

XCXIX

Une cuve cylindrique, à fond plat et horizontal, a $1^m,30$ de diamètre et $0^m,75$ de hauteur intérieurement; elle est à moitié pleine d'eau à 4 degrés, et on chauffe ce liquide en y faisant arriver de la vapeur à 100 degrés fournie par $5^k,250$ d'eau. On demande quelle sera la température du bain ainsi chauffé et quel en sera le volume.

On négligera la température du vase, et on prendra pour coefficient de dilatation de l'eau $\frac{1}{2200}$.

Le volume de l'eau $= \pi R^2 \times \frac{H}{2} = 3,1416 \times (0^m,65)^2 \times \frac{0^m,75}{2} = 497^{lit.},747.$

θ étant la température finale, et 540 le calorique de vaporisation de l'eau, on a donc (338, prob. V).

$$5^k,250 \times 540 + 5,250\,(100 - \theta) = 497,747\,(\theta - 4) ; \qquad \text{d'où } \theta = 10°,6.$$

Le volume total d'eau, après la condensation, serait, à 4 degrés,

$$497^{lit.},747 + 5^{lit.},250 = 502,997.$$

A 0°, le volume est donc $\dfrac{502,997}{1 + \frac{1}{2200} \times 4}$, et à 10°,6, il est

$$\frac{502,997 \times \left(1 + \frac{10,6}{2200}\right)}{1 + \frac{4}{2200}} = 504^{lit.},503.$$

C

On mêle 7^k de glace à 0 degré avec 30^k d'eau à 47 degrés; quelle sera la température du mélange?

Soit θ la température demandée; le calorique de fusion de la glace étant 79, on a pour la chaleur absorbée par la fusion de 7 kilogrammes, 79×7; de plus l'eau ainsi obtenue s'échauffant ensuite de 0° à θ, absorbe 7θ. Quant aux 30^k d'eau, ils se refroidissent de 47° à θ, et cèdent alors $30(47 - \theta)$. On a donc

$$79 \times 7 + 7\theta = 30(47 - \theta), \qquad \text{d'où } \theta = 23°,16.$$

CI

La chaleur latente de la vapeur d'eau étant supposée égale à 540, on demande à quelle température on élèvera 20 litres d'eau à 4 degrés, en y condensant 1 kilogramme de vapeur à 100 degrés et à la pression de $0^m,76$.

Soit θ la température finale, la chaleur cédée par un kilogramme sera 540, et celle cédée par l'eau résultant de la condensation sera $100 - \theta$; on aura donc $540 + 100 - \theta = 20(\theta - 4)$, d'où $\theta = 34°,28$.

CII

Combien faut-il de kilogrammes de glace à zéro pour liquéfier et ramener à zéro 25 kilogr. de vapeur, dégagés d'un appareil où le thermomètre marque 100°, et le baromètre $0^m,76$?

On a $\qquad 79x = 25 \times 540 + 25 \times 100$, d'où $x = 202^k,532^{gr}$.

CIII

Combien de vapeur d'eau, à 100°, faut-il pour porter de 8° à 25 l'eau contenue dans une cuve cylindrique à fond plat, de $1^m,25$ de rayon, et qui forme une couche de $0^m,75$ d'épaisseur?

Le volume de l'eau est $\pi R^2 H = 3681^{lit.},562$. Si l'on représente par P le poids cherché, on a donc

$$540\,P + (100 - 25)\,P = 3681^k,562\,(25 - 8), \qquad \text{d'où } P = 101^k,766.$$

CIV

La chaleur latente de la vapeur d'eau étant 540, on demande à quelle température on élèvera 20 litres d'eau pris à 4°, en y condensant 1 kilogr. de vapeur à 100°, sous la pression $0^m,76$.

On a $\qquad 1^k \times 540 + 1^k \times (100 - t) = 20(t - 4), \qquad$ d'où $t = 34°,28$.

CV

11 kilogrammes de glace à zéro ont été mélangés avec P kilogr. d'eau à 45°, le mélange a pris la température de 12°; on demande le poids P.

On a $\qquad P(45 - 12) = 79 \times 11 + 12 \times 11, \qquad$ d'où $P = 30^k,333^{gr}$.

CVI

Dans une certaine masse d'eau à 14°, on a fait condenser 25 kilogr. de vapeur d'eau bouillante à la pression ordinaire de l'atmosphère, la température de la masse d'eau s'étant élevée à 61°,4, on demande le poids de cette masse, en admettant qu'il n'y

a pas de chaleur employée à chauffer le vase, et qu'il ne s'en est pas perdu pendant l'expérience. On sait d'ailleurs que la chaleur latente de la vapeur d'eau est 530.

$$P = 302^{k},446^{gr}.$$

CVII

Dans 300 litres d'eau à 14°, on fait condenser 25 kilog. de vapeur d'eau bouillante à la pression 76; la température de la masse se trouvant alors élevée à 61°,4, on demande quelle est la chaleur de la vapeur latente d'eau.

$$x = 530,2.$$

CVIII

On mêle $3^{k},5$ de glace à 0° avec 45^{k} d'eau à 32°. On demande la température du mélange.

On a $\quad 45\,(32 - t_{,} = 3,5 \times 79 + 3,5t, \quad$ d'où $t = 23°,9.$

CIX

On mélange 1 kilog. d'eau à zéro avec 1 kilog. de mercure à 100°, on trouve que la température du mélange est 3°; quelle est la capacité calorifique du mercure?

$$c = 0,0309.$$

PROBLÈMES SUR LES VAPEURS.

CX

Dans un vase vide, d'une capacité de $2^{lit.},02$, on a introduit d'abord un litre d'air sec sous la pression $0^{m},76$, puis de l'eau en quantité telle qu'il en reste définitivement 20 centimètres cubes à l'état liquide. On demande la pression intérieure, en supposant que la température soit de 30° au moment de l'expérience, et que la tension maximum de la vapeur d'eau, à cette température, soit de $0^{m},031$.

La capacité du ballon étant réduite des 20 centimètres d'eau qui y restent à l'état liquide, elle n'est en réalité que $2^{lit.},02$ moins $0^{lit.},020$, ou 2 litres. Le volume d'air se trouve donc doublé, et, par conséquent, sa tension, qui était $0^{m},76$, n'est plus que $0^{m},38$, d'après la loi de Mariotte. Ajoutant à cette pression celle de la vapeur, qui est $0^{m},031$, on a pour la pression intérieure totale $0^{m},411$.

CXI

Une certaine quantité d'air pèse $5^{gr},2$, à la température 0 degré et sous la pression $0^{m},76$. On la chauffe à 30°, sous la pression $0^{m},77$, en lui permettant de se saturer de vapeur d'eau. On demande quel sera alors le volume qu'elle occupera. La tension maximum de la vapeur à 30 degrés est de $0^{m},0315$, et on prendra $1^{gr},3$ pour poids du litre d'air sec à la température de 0° et sous la pression $0^{m},76$.

Le poids d'un litre d'air sec étant $1^{gr},3$, le volume correspondant à $5^{gr},2$ égale $\frac{5,2}{1,3} = 4$ litres, à 0 degré et à la pression $0^{m},76$. A 30°, le volume est donc $4\,(1 + 0,00366 \times 30)$; volume qui, à la pression $0^{m},77$, serait

$$\frac{4 \times 76\,(0 + 0{,}00366 \times 30)}{77},$$

l'air étant sec. Mais lorsque l'air est saturé de vapeur dont la tension est $0^m{,}0315$, c'est cette tension, plus la force élastique de l'air, qui, d'après la deuxième loi des mélanges des gaz et des vapeurs (304), font équilibre à la pression $0^m{,}77$; donc la pression de l'air est $0^m{,}77 - 0^m{,}0315$, et, par conséquent, le volume demandé est $\frac{4 \times 76\,(1 + 0{,}00366 \times 30)}{77 - 3{,}15} = 4^{lit.}{,}68$.

CXII

Le poids d'un litre d'air à zéro et à la pression $0^m{,}76$, est $1^{gr}{,}299$, et la densité de la vapeur d'eau prise par rapport à l'air est $\frac{5}{8}$. Cela posé, on demande quel est, à 30 degrés et à la pression 0,77, le poids d'un mètre cube d'air dont l'état hygrométrique est $\frac{3}{4}$, la tension maximum de la vapeur à 30 degrés étant $0^m{,}0315$.

Commençons par observer que la tension de la vapeur saturée étant $0^m{,}0315$, cette tension n'est plus que les $\frac{3}{4}$ de $0^m{,}0315$ lorsque la vapeur est à l'état hygrométrique $\frac{3}{4}$. De plus, l'air dont on demande le poids, n'est pas, d'après la loi des mélanges (304), à la pression 77, mais à cette pression moins celle de la vapeur, c'est-à-dire à la pression $(0^m{,}77 - \frac{3}{4} \,.\, 0^m{,}0315)$.

Le problème revient donc à chercher d'abord le poids d'un mètre cube d'air sec à 30° et à la pression $(0^m{,}77 - \frac{3}{4} \,.\, 0^m{,}0315)$, puis celui d'un mètre cube de vapeur à 30° et à la tension $\frac{3}{4} \,.\, 0^m{,}0315$, puis à faire la somme des deux poids.

1° A 30° et à la pression $0^m{,}77 - \frac{3}{4} \,.\, 0^m{,}0315 = 0^m{,}7464$, 1 mètre cube d'air sec pèse

$$\frac{1299^{gr} \times 74{,}64}{(1 + 30\alpha)76} \quad [1];$$

2° A 30° et à la pression $\frac{3}{4} \,.\, 0^m{,}0315$, 1 mètre cube de vapeur pèse

$$\frac{1299^{gr} \times 3{,}15 \times 5 \times 3}{(1 + 30\alpha)\,76 \times 8 \times 4} \quad [2].$$

Faisant la somme des formules [1] et [2], on a pour le poids demandé,

$$\frac{1299^{gr}}{(1 + 30\alpha)76}\left\{74^{c}{,}84 + \frac{3{,}15 \times 5 \times 3}{8 \times 4}\right\} = 1172^{gr}{,}3.$$

APPENDICE — 2e PARTIE

ÉNONCÉS

DE PROBLÈMES

DONNÉS EN SUJET DE COMPOSITION

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS.

I. — Un bloc de glace prismatique, flottant sur la mer, s'élève à 6 mètres au-dessus de sa surface. On demande la hauteur totale du bloc, en prenant 1,026 pour densité de l'eau de mer, et 0,80 pour celle de la glace.

II. — Un corps poreux a pour densité 0,854, son volume est de $0^{m.cub.},130$; combien doit-il absorber d'eau pour immerger totalement dans ce liquide?

III. — Quel est le rapport des poids x et y de deux cylindres de fer et de platine qu'il faudrait attacher ensemble pour que le système pût se tenir en équilibre au milieu du mercure, la densité du platine étant 21, celle du mercure 13,6, et celle du fer 7,8.

IV. — On place, dans un des plateaux d'une balance, un corps, et dans l'autre, des poids s'élevant à 240^{gr} pour qu'il y ait équilibre. Puis on change le corps de plateau, et il faut alors 280^{gr} pour lui faire équilibre. On demande le poids du corps.

V. — On fait jouer une machine pneumatique jusqu'à ce que la tension, qui était $0^{m},75$, soit $0^{m},15$; la cloche a une capacité de $6^{lit.},45$, et le corps de pompe de $1^{lit.}$; la température étant constante, quel est, au moins, le nombre de coups de piston nécessaire.

VI. — Exprimer en degrés centigrades, la différence entre — 15 degrés Réaumur, et — 10 degrés Fahrenheit.

VII. — Deux corps de pompe verticaux et cylindriques communiquent entre eux par un tube horizontal, l'un à une section de 10 centimètres carrés, l'autre de 2 décimètres carrés; l'eau étant en équilibre dans l'appareil, si l'on pose sur la surface du liquide, dans le plus grand corps de pompe, un piston pesant 200 kilogrammes, avec quelle force faudra-t-il presser la surface du liquide, dans le petit, pour empêcher le piston de descendre.

VIII. — Un baromètre marque $0^{m},775$, à la température de $15^{\circ},2$; cette hauteur est prise sur une règle métallique dont le coefficient de dilatation est $\frac{1}{21000}$; le coeffi-

cient de dilatation absolue du mercure est $\frac{1}{5550}$; on demande la hauteur du baromètre réduite à zéro.

IX. — Quelle serait la hauteur de la couche d'eau de pluie nécessaire pour fondre une couche de glace, à 0°, d'une épaisseur de 0m,05, en supposant l'eau de pluie à la température de 15 degrés.

X. — Un vase de laiton pesant 100 grammes, contient 200 grammes d'eau à 0°, et 100 grammes de glace aussi à 0°. On demande combien il faut y faire arriver de vapeur d'eau à 100°, sous la pression 0m,76, pour que la glace se fonde et que le mélange atteigne la température de 10°.

La capacité du laiton pour la chaleur est 0,0939; la chaleur de fusion de la glace 79,25; et la chaleur latente de la vapeur d'eau 537.

ÉNONCÉS DE PROBLÈMES DONNÉS DANS LES FACULTÉS DES SCIENCES DE PROVINCE.

I. — Un liquide dont la densité est 1,82 remplit un vase ayant intérieurement la forme d'un tronc de cône; la hauteur du tronc de cône est égale à 20 centimètres, les rayons des bases sont 12 et 15 centimètres. Déterminer le volume et le poids du liquide contenu dans le vase.

II. — Calculer, en kilogrammes, la pression atmosphérique sur une sphère de 675 centimètres de rayon, la hauteur barométrique étant de 720 millimètres.

III. — 561k,731 étant le poids d'une sphère dont le rayon est de 0m,25; trouver la densité de la matière de la sphère.

IV. — On donne un vase cylindrique de 31 centimètres de hauteur et de 50 centimètres de diamètre. Ses parois métalliques ont un centimètre d'épaisseur et une densité égale à 7.

1° Trouver le poids du vase en grammes;

2° Calculer, en centimètres, la hauteur de la partie du vase qui serait immergée si on le plongeait dans l'eau.

V. — Un cône dont la hauteur est égale à 15 décimètres, et dont le rayon de la base est de 6 décimètres, flotte verticalement par sa base sur un liquide, et s'y enfonce de 2 décimètres.

1° On demande le volume du liquide déplacé par le tronc de cône immergé;

2° On retourne le même cône pour le plonger par son sommet, et on demande la hauteur de la partie du cône qui sera alors immergée.

VI. — Calculer la pression atmosphérique exercée, dans le sens vertical, sur une sphère de 1m,25 de diamètre, la hauteur du baromètre étant 76 cent.

VII. — Calculer le poids de l'atmosphère, en supposant la hauteur barométrique égale à 0m,76, et le rayon de la terre, considérée comme sphérique, égal à 6366 kilomètres. Calculer le volume de la masse d'or équivalente en poids, la densité de l'or étant 19,363, et celle du mercure 13,593.

VIII. — Trouver, à un centimètre près, le rayon d'une sphère de plomb dont le poids est de 527 kilogrammes, la densité du plomb étant 11,35.

IX. — Un vase cylindrique dont le diamètre est de $0^m,315$ a été rempli d'eau jusqu'à un certain niveau le 1er juillet 1853; cinq jours après, on trouve que pour ramener l'eau au même niveau il faut ajouter $4^k,320^{gr}$ d'eau; on demande la hauteur de la couche évaporée.

En supposant le poids de l'eau exact à 1^{gr} près, quel est le degré d'approximation avec lequel est déterminée la hauteur de la couche d'eau évaporée?

X. — Un cylindre attaché à l'un des plateaux d'une balance hydrostatique, et plongé dans l'eau, a été équilibré, l'eau étant à + 4 degrés. On porte cette eau à + 9°. On demande dans quel sens l'équilibre sera rompu, et le poids qu'il faudra ajouter pour le rétablir.

On emploiera les données suivantes : circonférence du cylindre $= 0^m,135$; hauteur $= 0^m,12$; densité de l'eau à 4 degrés $= 1$; densité du même liquide à + 9 degrés $= 0,98809$.

XI. — Un cylindre de laiton pèse 50 kilogrammes, la circonférence de sa base est de $0^m,650$, la densité du laiton est de 8,44; on demande la hauteur du cylindre.

XII. — Un cylindre de tôle, fermé de toutes parts, a extérieurement $2^m,50$ de diamètre, et $1^m,75$ de hauteur; la tôle a $0^m,01$ d'épaisseur. On demande si, plongé dans l'eau, il surnagera, et, dans le cas de l'affirmative, de combien son axe plonge dans le liquide. On suppose que la densité de la tôle est 7,79.

XIII. — Un cône dont la hauteur est de 5 mètres, et égale au diamètre de la base, étant plongé dans l'eau de manière que son axe soit vertical, y reste en équilibre quand le niveau du liquide coupe l'arête aux $\frac{2}{3}$ de sa longueur à partir du sommet; on demande son poids.

XIV. — Calculer l'épaisseur d'une sphère creuse de laiton, son diamètre extérieur étant de $0^m,750$, son poids de $67^k,800$, et la densité du laiton 8,39.

XV. — Un cylindre à base circulaire étant plongé dans l'eau de manière que son axe soit horizontal, y reste en équilibre quand l'axe du cylindre est au-dessus du niveau d'une quantité égale au demi-rayon. On demande son poids, sachant que la longueur du cylindre $= 20^m$, et que le diamètre de sa base $= 12^m$ (calculer par logarithmes).

XVI. — Calculer l'arête d'un tétraèdre régulier, d'or, dont le poids est 2^k, sachant que le poids spécifique de l'or est 19,26.

XVII. — Un corps plongé dans un liquide de plus grande densité que lui, en déplace un volume de 3 décimètres cubes; quel sera le nouveau volume déplacé, si la température du liquide s'élève de 100°, son coefficient de dilatation étant $\frac{1}{500}$?

XVIII. — La longueur d'une barre métallique étant de $3^m,930$, à la température de 0°, et de $3^m,951$, à la température de 83°, calculer les coefficients de dilatation linéaire et cubique du métal.

XIX. — Étant donné le volume V d'un gaz à la température t et à la pression h, démontrer la formule qui fait connaître le volume V' du gaz à la température t' et sous la pression h'.

XX. — L'air étant à la pression de 540 millimètres de hauteur de mercure, et le poids du mètre cube étant 832 grammes, trouver sa température. On sait que le coefficient de dilatation de l'air est 0,00366, et que le poids du mètre cube d'air est $1^{k},3$, à la température zéro et à 760 millimètres de pression.

XXI. — La hauteur du baromètre, à $12^{\circ}\frac{7}{10}$, étant de $0^{m},757$, la réduire à 0°.

XXII. — Le volume d'une masse de gaz à $-11^{\circ},2$, sous la pression de 765 millimètres, est de $47^{lit},250$, quel sera le volume de la même masse gazeuse à $+35^{\circ}$ et sous la pression de 778 millimètres.

XXIII. — La température de fusion d'un corps étant 120°, sa chaleur spécifique étant 0,03 à l'état solide, et 0,04 à l'état liquide, déduire sa chaleur latente de fusion des données suivantes : 3 kilogrammes du corps ont été plongés à l'état solide et à 100° de température dans un bain liquide de la même substance ayant 135° de température et pesant 80 kilogrammes; on a trouvé, après la fusion du corps solide, que la température finale du bain était de 130°.

XXIV. — Calculer la chaleur spécifique de l'essence de térébenthine et exposer en même temps la méthode générale employée pour déterminer la chaleur spécifique des liquides, sachant que $42^{gr},57$ d'essence à $33^{\circ},7$ ont été mélangés avec $470^{gr},3$ d'eau à $12^{\circ},23$, et que la température du mélange a été de $15^{\circ},57$. On supposera l'essence de térébenthine renfermée dans un tube de verre du poids de $5^{gr},25$, et d'une chaleur spécifique égale à 0,177; l'eau contenue dans un vase de cuivre pesant $45^{gr},25$, et dont la capacité calorifique est 0,035.

XXV. — 750 grammes de fer à $100^{\circ},75$ sont mélangés avec 425 grammes d'eau à $10^{\circ},24$; la chaleur spécifique du fer étant 0,1138, quelle sera, abstraction faite du réchauffement ou du refroidissement par le contact de l'air ambiant et du vase, la variation de température de l'eau ?

XXVI. — 575 kilogrammes de glace sont mélangés avec 2250 kilogrammes d'eau dont la température est de 30°; décider si la glace sera fondue, et dans le cas de l'affirmative, calculer la température finale, abstraction faite des pertes et des gains de chaleur.

XXVII. — Trouver, en kilogrammes, le poids d'un mètre cube de vapeur d'eau à 25° et à la pression de 20 millimètres de hauteur de mercure, sachant qu'un mètre cube d'air sec pèse $1^{k},300^{gr}$ à 0° et à la pression 760 millimètres, et que la densité de la vapeur d'eau par rapport à celle de l'air est 0,625.

Trouver, en mètres, le rayon d'une sphère qui pourrait contenir 1 kilogramme de la même vapeur.

APPENDICE — 3e PARTIE

CHOIX DE PROBLÈMES

PAR L'AUTEUR

I. — Quelle serait, à Paris, la longueur à donner à un pendule, pour que la durée de ses oscillations fût de sept secondes ?

De la formule $T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ (59), on tire

$$l = \frac{g \times T^2}{\pi^2} = \frac{9{,}8088 \times 49}{(3{,}1416)^2} = 48^m{,}69.$$

II. — Quelle est l'intensité de la pesanteur sous l'équateur, où la longueur du pendule à secondes est $0^m{,}991$?

La formule $T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ donne

$$g = \frac{\pi^2 \times l}{T^2} = (3{,}1416)^2 \times 0{,}991 = 9^m{,}7808.$$

III. — Une boule de platine pèse 100 grammes dans l'air, $95^{gr}{,}4$ dans l'eau, et $91^{gr}{,}5$ dans l'acide sulfurique ; on demande le poids spécifique du platine et celui de l'acide sulfurique.

Le poids de l'eau déplacée est $100 - 95{,}4 = 4{,}6$, et le poids de l'acide déplacé est $100 - 91{,}5 = 8{,}5$;

Donc le poids spécifique du platine égale $\frac{100}{4{,}6} = 21{,}7$,

et celui de l'acide égale $\frac{8{,}5}{4{,}6} = 1{,}84$.

IV. — Le poids spécifique du zinc étant 7, et celui du cuivre 9, quelles quantités de zinc et de cuivre doit-on prendre pour former un alliage qui pèse 50 grammes, et dont le poids spécifique soit 8,2, en admettant que le volume de l'alliage soit exactement la somme des volumes des métaux alliés ?

Soient x et y les poids de zinc et de cuivre demandés.

On a d'abord $x + y = 50$ [1] ; et, d'après la formule connue $P = VD$, qui donne $V = \frac{P}{D}$, les volumes des deux métaux et de leur alliage sont respectivement $\frac{x}{7}$, $\frac{y}{9}$ et $\frac{50}{8{,}2}$; on a donc $\frac{x}{7} + \frac{y}{9} = \frac{50}{8{,}2}$ [2].

Résolvant les équations [1] et [2], on trouve $x = 17{,}07$, et $y = 32{,}93$.

V. — Un cône de fer ASB (fig. 566) plongeant dans le mercure par son sommet, on demande le rapport de la hauteur du cône immergé OS, à la hauteur totale CS, sachant que la densité du fer est d et celle du mercure d'.

Soient h la hauteur totale SC, h' la hauteur SO, R et r les rayons CB et OK. Le volume du grand cône est $\frac{\pi R^2 h}{3}$, et son poids $\frac{\pi R^2 h d}{3}$, d'après la formule connue $P = VD$. De même, le volume du cône immergé est $\frac{\pi r^2 h'}{3}$, et par suite, le poids du mercure déplacé par le cône de fer est $\frac{\pi r^2 h' d'}{3}$. Mais ces poids doivent être égaux (98), on a donc, en supprimant le facteur commun $\frac{\pi}{3}$,

Fig. 566.

$$R^2 h d = r^2 h' d' ;$$

$$\text{d'où } \frac{h'}{h} = \frac{R^2}{r^2} \times \frac{d}{d'} \quad [1].$$

Mais les triangles BCS et KOS étant semblables, on a $\frac{R}{r} = \frac{h}{h'}$.

Portant cette valeur de $\frac{R}{r}$ dans l'égalité [1], on a $\frac{h'}{h} = \frac{h^2}{h'^2} \times \frac{d}{d'}$

$$\text{d'où } \frac{h'^3}{h^3} = \frac{d}{d'} ;$$

et extrayant la racine cubique des deux membres, il vient enfin

$$\frac{h'}{h} = \frac{\sqrt[3]{d}}{\sqrt[3]{d'}} ;$$

c'est-à-dire que *les hauteurs des deux cônes sont en raison inverse des racines cubiques des densités du corps immergé et du liquide, et cela quel que soit l'angle au sommet du cône.*

VI. — Une règle de platine de 2 mètres de longueur est divisée, à l'une de ses extrémités, en quarts de millimètre ; une règle de cuivre de $1^m{,}950$ étant appliquée dessus, à zéro, en diffère de $0^m{,}050$, c'est-à-dire de 200 divisions de la règle de platine. On demande quelle est la température commune aux deux règles lorsqu'elles diffèrent de 164 divisions de la règle de platine, le coefficient de dilatation du platine étant 0,000008842, et celui du cuivre 0,000017182.

La longueur de la règle de platine, qui est 8000 divisions, à zéro, est

$$8000\,(1 + 0{,}000008842 \times t) \text{ à } t \text{ degrés (251).}$$

La règle de cuivre, qui vaut 7800 divisions, à zéro, vaut, à t degrés,

$$7800\,(1 + 0{,}000017182 \times t).$$

Enfin, les 164 divisions apparentes équivalent en réalité à

$$164\,(1 + 0{,}000008842 \times t).$$

On a donc

$$8000\,(1+0{,}000008842\times t)-7800\,(1+0{,}000017182\times t)=164\,(1+0{,}000008842\times t),$$

$$\text{d'où l'on tire } t=\frac{36}{0{,}0647337}=556^{\circ}$$

VII. — Voulant comparer l'intensité d'une lampe Carcel à celle d'une bougie, au moyen du photomètre de Rumford (fig. 237), on trouve que les ombres portées sur l'écran paraissent de même intensité, lorsque la bougie étant à 2 mètres de l'écran, la lampe en est à 4m,74. Quelle est l'intensité de la lampe, celle de la bougie étant prise pour unité?

Soit I l'intensité de la lampe à l'unité de distance, à la distance de 4m,74, elle sera $\frac{I}{(4{,}74)^2}$ (403); de même, celle de la bougie, qui est 1 à l'unité de distance sera $\frac{1}{4}$, à la distance de 2 mètres. Mais à ces distances les deux intensités sont égales; on a donc

$$\frac{I}{(4{,}74)^2}=\frac{1}{4},\ \text{d'où } I=\frac{(4{,}74)^2}{4}=5{,}617.$$

VIII. — Une lampe et une bougie sont distantes l'une de l'autre de 3m,15, et l'intensité de la lumière de la bougie étant 1, à l'unité de distance, celle de la lampe est 5,6; à quelle distance de la lampe, sur la ligne droite qui joint les deux lumières, doit-on placer un écran, pour qu'il soit également éclairé par l'une et par l'autre, sachant que l'intensité d'une lumière est en raison inverse du carré de la distance.

Soit x la distance à laquelle l'écran doit être placé de la lampe; sa distance de la bougie sera $3^m{,}15-x$. Cela posé, l'intensité de la lampe, qui est 5,6 à l'unité de distance, est $\frac{5{,}6}{x^2}$ à la distance x; et celle de la bougie étant 1, à l'unité de distance, est $\frac{1}{(3{,}15-x)^2}$ à la distance $3{,}15-x$. Mais alors les intensités sont égales; on a donc

$$\frac{5{,}6}{x^2}=\frac{1}{(3{,}15-x)^2},\ \text{ou}\ \left(\frac{3{,}15-x}{x}\right)^2=\frac{1}{5{,}6}=\frac{10}{56}=\frac{5}{28},$$

et en extrayant la racine, $\frac{3{,}15-x}{x}=\pm\sqrt{\frac{5}{28}}=\pm 0{,}422$; d'où l'on déduit les deux valeurs $x=2^m{,}21$ et $x=5^m{,}45$. Le première correspond à un point situé entre les deux lumières; la seconde donne un point situé sur le prolongement de la droite qui les joint.

IX. — Devant un miroir sphérique concave de 0m,95 de rayon, on place, à la distance de 3m,4, un objet BD (fig. 257) dont la hauteur est de 0m,12; on demande la distance de l'image au miroir et sa grandeur.

Ce problème se résout par la formule $\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{2}{R}$, donnée en optique (424, dans laquelle p représente la distance de l'objet au miroir, p' la distance de l'image, et R le rayon de courbure du miroir. D'après l'énoncé, on a, en centimètres, $p=340$ et $R=95$; substituant dans l'équation ci-dessus, il vient $\frac{1}{340}+\frac{1}{p'}=\frac{2}{95}$; chassant les dénominateurs, on trouve :

$$95\,p' + 340 \times 95 = 2 \times 340\,p',\ \text{ou } 585\,p' = 32300,\ \text{d'où } p' = 55^c,2.$$

Pour calculer la grandeur bd de l'image, il faut se rappeler ce qui a été dit au paragraphe 422, dans lequel on a vu que les triangles BDC et C$d$$b$ (fig. 257) étant semblables, on a $\frac{bd}{BD} = \frac{Co}{CK}$, d'où $bd = \frac{BD \times Co}{CK}$. Or, par hypothèse,

$$BD = 12,\ CK = p - R = 3^m,4 - 0^m,95 = 2^m,45;$$

et d'après la valeur de p', on a $Co = CA - Ao = 95^c - 55^c,2 = 39^c,8$; donc

$$bd = \frac{12 \times 39,8}{245} = 1^c,95.$$

X. — Le manomètre de la chaudière d'une machine à vapeur marquant 2 atmosphères $\frac{3}{4}$, le piston de la machine ayant 22 centimètres de rayon, et sa course étant de $1^m,15$ par seconde, on demande quel poids la machine peut élever à 8 mètres de hauteur par seconde, abstraction faite de toute résistance.

Le rayon du piston étant de 22 centimètres, sa surface, en centimètres carrés, est $\pi R^2 = 1520^{cc},53$. Or, la pression, sur un centimètre carré, étant de $1^k,033$ pour une atmosphère (137), elle est, pour 2 atmosphères $\frac{3}{4}$, $1^k,033 \times \left(2 + \frac{3}{4}\right) = 2^k,841$. Donc, sur la surface totale du piston, la pression est $2^k,841 \times 1520,53 = 4319^k,825$.

Par conséquent, la course du piston étant de $1^m,25$ par seconde, il peut élever, en une seconde, à $1^m,25$ de hauteur, $4319^k,825$.

Il élèverait donc, dans le même temps, à 1 mètre seulement, un poids égal à $4319^k,825 \times 1^m,25$, car le poids élevé par la machine est évidemment d'autant plus grand que la hauteur est plus petite ; par suite, le poids élevé à 8 mètres en une seconde ne sera que $\frac{4319^k,825 \times 1^m,25}{8}$, et enfin le poids élevé en une minute sera

$$\frac{4319,825 \times 1,25 \times 60}{8} = 80996 \text{ kilogrammes.}$$

XI. — Un fil d'argent de 125 mètres de long pèse 6 grammes ; on demande son diamètre, sachant que le poids spécifique de l'argent est 10,474.

Ce fil n'étant autre chose qu'un cylindre dont la hauteur est de 125 mètres, et dont la base est un petit cercle qui a pour diamètre le diamètre demandé, si l'on représente ce dernier par x, le volume du fil le sera par $\frac{\pi x^2}{4} \times 125$ [1]; or, comme la formule $P = VD$ (107) donne $V = \frac{P}{D} = \frac{6^{gr}}{10,474}$ [2], on peut égaler l'expression [2] à l'expression [1], puisque toutes les deux représentent le volume du fil. Toutefois, il faut les rapporter toutes les deux à la même unité de volume, car la première donne le volume du fil en mètres cubes, tandis que la seconde le donne en centimètres cubes (107). Pour cela, il faut convertir l'expression [1] en centimètres cubes en la multipliant par un million, puisqu'on sait qu'un mètre cube contient un million de centimètres cubes. On posera donc

$$\frac{\pi x^2 \times 125000000}{4} = \frac{6}{10,474};$$

$$\text{d'où } x = \sqrt{\frac{24}{125000000 \times 10,174 \times 3,1416}} = 0^{mill.},00076.$$

XII. — Calculer le rayon d'un boulet de fonte de 24 kilogrammes, sachant que le poids spécifique de la fonte est 7,21.

D'après la formule $P = VD$, on a $V = \frac{P}{D} = \frac{24}{7,21}$, le volume étant mesuré en décimètres cubes. Or, étant le rayon du boulet, on sait que le volume de celui-ci égale $\frac{4\pi R^3}{3}$. On a donc

$$\frac{4\pi R^3}{3} = \frac{24}{7,21}; \text{ d'où } R^3 = \frac{3 \times 24}{4\pi \times 7,21} = \frac{72}{4 \times 3,1416 \times 7,21} = 0^{\text{déc.}},794.$$

XIII. — On forme un alliage de deux métaux dont les poids spécifiques sont D et D'; on demande celui de l'alliage, sachant que le volume de celui-ci a subi une contraction égale à $\frac{1}{m}$ de la somme des volumes composants, et les poids des deux métaux étant respectivement P et P'.

D'après la formule $P = VD$, qui donne $V = \frac{P}{D}$, les volumes des deux métaux alliés sont respectivement $\frac{P}{D}$ et $\frac{P'}{D'}$, et la m^{me} partie de leur somme est $\frac{1}{m}\left(\frac{P}{D} + \frac{P'}{D'}\right)$ par conséquent, le volume du mélange est

$$\frac{P}{D} + \frac{P'}{D'} - \frac{1}{m} \times \left(\frac{P}{D} + \frac{P'}{D'}\right) = \left(\frac{P}{D} + \frac{P'}{D'}\right)\left(\frac{m-1}{m}\right).$$

Mais en représentant par d le poids spécifique cherché, le volume de l'alliage le sera par $\frac{P+P'}{d}$. On a donc

$$\frac{P+P'}{d} = \left(\frac{P}{D} + \frac{P'}{D'}\right)\left(\frac{m-1}{m}\right)$$

d'où l'on tire $$d = \frac{(P+P')\,DD'm}{(PD'+P'D)(m-1)} \quad [A].$$

Si au lieu d'une contraction de l'alliage, il y avait dilatation, on trouverait par un calcul semblable

$$d = \frac{(P+P')\,DD'm}{(PD'+P'D)(m+1)} \quad [B].$$

XIV. — Ayant mélangé 18 kilogrammes d'acide sulfurique avec 8 kilogrammes d'eau, on demande le poids spécifique du mélange, sachant que le poids spécifique de l'eau est 1, celui de l'acide sulfurique 1,84, et en supposant que le volume du mélange a subi une contraction de $\frac{1}{32}$.

En faisant usage de la formule [A] du problème précédent, on trouve

$$d = \frac{(P+P')\,DD'm}{(PD'+P'D)(m-1)} = \frac{(8+18)\,1,84 \times 32}{32,72 \times 31} = 1,50.$$

XV. — On fond ensemble P kilogrammes d'un métal dont le poids spécifique est D

avec P' kilogrammes d'un autre métal dont le poids spécifique est D'; le poids spécifique de l'alliage étant d, on demande s'il y a eu contraction ou dilatation, et la valeur du coefficient de contraction ou de dilatation $\frac{1}{m}$.

La formule [A] du problème XIII, laquelle correspond à la contraction du volume de l'alliage, étant résolue par rapport à m, donne

$$m = \frac{(PD' + P'D)\,d}{(PD' + P'D)\,d - (P + P')\,DD'} \quad [C].$$

Or, la quantité m, qui est le dénominateur de la fraction de contraction, étant nécessairement positive, sinon le coefficient $\frac{1}{m}$ serait lui-même négatif, ce qui n'aurait pas de sens; il faut, pour qu'il y ait contraction, qu'on ait

$$(PD' + P'D)\,d > (P + P')\,DD', \qquad \text{ou } d > \frac{(P + P')\,DD'}{PD' + P'D}.$$

Or, en divisant le numérateur et le dénominateur par DD', cette dernière formule peut se mettre sous la forme $d > \frac{P + P'}{\frac{P}{D} + \frac{P'}{D'}}$, et elle est alors facile à interpréter. En effet, P + P' étant le poids de l'alliage, et $\frac{P}{D} + \frac{P'}{D'}$ la somme des volumes des métaux alliés, il s'ensuit que l'expression $\frac{P + P'}{\frac{P}{D} + \frac{P'}{D'}}$ est précisément le poids spécifique qu'aurait l'alliage s'il n'y avait ni contraction ni dilatation, d'après la formule connue $D = \frac{P}{V}$. Or, lorsqu'il y a contraction, le poids spécifique est augmenté, d'où il faut qu'on ait

$$d > \frac{P + P'}{\frac{P}{D} + \frac{P'}{D'}}.$$

Il découle de là que lorsqu'il y a dilatation, on doit avoir $d < \frac{P + P'}{\frac{P}{D} + \frac{P'}{D'}}$; c'est, en effet, la condition à laquelle conduit la formule [B] du problème XIII, si on la résout par rapport à m.

Si l'on a $d = \frac{(P + P')\,DD'}{PD' + P'D}$, la formule [C] donne $m = \infty$; d'où la fraction $\frac{1}{m} = 0$; c'est-à-dire qu'il n'y a ni contraction ni dilatation.

XVI. — Connaissant le volume d'air V contenu dans le récipient et dans le conduit d'une machine pneumatique, le volume v d'un des corps de pompe, et représentant par M la masse totale de l'air du récipient et du conduit, on demande la masse d'air qui restera dans la machine après n coups de piston simples, et quelle en sera la tension.

Quand le piston s'élève du bas du corps de pompe à son sommet, le volume d'air V

devient $V + v$, sa masse étant toujours M. Or, la masse d'air soustraite étant proportionnelle au volume v, en la représentant par m, on a $\frac{m}{M} = \frac{v}{V+v}$,

$$\text{d'où } m = \frac{Mv}{V+v}.$$

L'air qui reste est donc $M - \frac{Mv}{V+v} = \frac{MV}{V+v} = M'$.

On trouve de même que la quantité d'air enlevée au deuxième coup de piston est

$$\frac{M'v}{V+v} = \frac{Mv}{V+v} \cdot \frac{V}{V+v}$$

au troisième coup, $\frac{Mv}{V+v} \cdot \frac{V^2}{(V+v)^2}$

au $n^{\text{ième}}$ coup, $\frac{Mv}{V+v} \cdot \frac{V^{n-1}}{(V+v)^{n-1}}$.

Tout l'air retiré après n coups de piston est donc

$$\frac{Mv}{V+v}\left\{1 + \frac{V}{V+v} + \frac{V^2}{(V+v)^2} + \ldots + \frac{V^{n-1}}{(V+v)^{n-1}}\right\} \quad [A]$$

Or, la partie entre parenthèses n'étant autre chose qu'une progression par quotient décroissante, dont le premier terme est 1 et la raison $\frac{V}{V+v}$, si l'on fait usage de la formule $S = \frac{a - lr}{1 - r}$ qui sert, en algèbre, à calculer la somme des termes d'une progression par quotient décroissante dont le premier terme est a, le dernier l, et la raison r, on trouve que la somme des termes entre parenthèses est

$$\frac{V+v}{v} - \frac{V}{v} \cdot \frac{V^{n-1}}{(V+v)^{n-1}}.$$

La formule [A] devient donc

$$\frac{Mv}{V+v}\left\{\frac{V+v}{v} - \frac{V}{v} \cdot \frac{V^{n-1}}{(V+v)^{n-1}}\right\} = M - M\frac{V^n}{(V+v)^n},$$

dont le second membre représente la masse d'air enlevée après n coups de piston; celle qui reste est donc $M\frac{V^n}{(V+v)^n}$.

Pour calculer quelle est alors la tension t, qu'on supposera avoir été d'abord $0^m,76$, il suffit d'observer, d'après la loi de Mariotte, que la tension de l'air, sous le récipient, est proportionnelle à sa masse, ce qui donne

$$\frac{t}{0,76} = \frac{MV^n}{(V+v)} : M, \qquad \text{d'où } t = 0,76 \times \frac{V^n}{(V+v)^n}.$$

XVII. — Combien faut-il de coups de piston simples, n, pour amener de la pression $0^m,76$ à la pression 0,002, l'air qui est sous le récipient d'une machine pneumatique, le volume du récipient étant de 10 litres, et celui de chaque corps de pompe de 1 litre?

Cette question se résout facilement à l'aide de la formule $t = \frac{0^m,76 \times V^n}{(V + v)^n}$, obtenue dans le problème XVI, en y faisant $t = 0,002$, $V = 10$ et $v = 1$, ce qui donne $\frac{2}{760} = \left(\frac{10}{11}\right)^n$, ou $\left(\frac{11}{10}\right)^n = 380$. Prenant les logarithmes des deux membres, on a $n \times l.\left(\frac{11}{10}\right) = l.\ 380$, d'où $n = \frac{l.\ 380}{l.\ 11 - l.\ 10} = 62$.

XVIII. — On a un cube de plomb de 4 centimètres de côté qu'on veut soutenir dans l'eau en le suspendant à une sphère de liége. Quel diamètre doit avoir celle-ci pour que sa poussée de bas en haut fasse équilibre au poids du cube de plomb, le poids spécifique de ce corps étant 11,35 et celui du liége 0,24 ?

Le volume du cube de plomb est 64 centimètres cubes; par conséquent, son poids dans l'air est $64 \times 11,35$, et son poids dans l'eau $64 \times 11,35 - 64 = 662^{gr},40$.

Si l'on représente par r le rayon de la sphère de liége, en centimètres, son volume en centimètres cubes, sera $\frac{4\pi r^3}{3}$; donc son poids, en grammes, sera $\frac{4\pi r^3 \times 0,24}{3}$. Cela posé, le poids de l'eau déplacée par la sphère de liége étant évidemment, en grammes, $\frac{4\pi r^3}{3}$, il en résulte une poussée de bas en haut égale à

$$\frac{4\pi r^3}{3} - \frac{4\pi r^3 \times 0,24}{3} = \frac{4\pi r^3 \times 0,76}{3}.$$

Or, cette poussée doit égaler le poids du plomb, donc on a

$$\frac{4\pi r^3 \times 0,76}{3} = 662^{gr},40,$$

d'où $$r = \sqrt[3]{\frac{1987,20}{3,04 \times 3,1416}} = 5^c,92;$$

d'où le diamètre demandé est $11^c,84$.

XIX. — On veut construire une sphère creuse, de cuivre rouge, qui, plongée dans l'eau s'y enfonce juste de moitié; quel doit être le rapport de l'épaisseur de la paroi de la sphère à son rayon extérieur, celui-ci étant indéterminé, et la densité du cuivre étant 8,788 ?

Soit R le rayon extérieur, r le rayon intérieur; l'épaisseur de la paroi est $R - r$, et le rapport demandé est $\frac{R - r}{R}$.

Or, le volume extérieur de la sphère étant $\frac{4\pi R^3}{3}$, et son volume intérieur $\frac{4\pi r^3}{3}$ le volume de la paroi est $\frac{4\pi R^3}{3} - \frac{4\pi r^3}{3} = \frac{4\pi}{3}(R^3 - r^3)$, et son poids égale $\frac{4\pi}{3}(R^3 - r^3) \times 8,788$. D'ailleurs celui de l'eau déplacée étant $\frac{1}{2} \cdot \frac{4\pi R^3}{3}$, on doit avoir, en supprimant le facteur commun $\frac{4\pi}{3}$,

$$(R^3 - r^3) \times 8,788 = \frac{R^3}{2}, \quad \text{d'où } R^3 \times 16576 = r^3 \times 17576;$$

$$\text{d'où l'on tire } \frac{R}{r} = \sqrt[3]{\frac{17576}{16576}} = 1,02.$$

Cette dernière égalité donne successivement

$$\frac{R}{1,02} = \frac{r}{1}, \quad \frac{R-r}{0,02} = \frac{R}{1,02}, \text{ et } \frac{R-r}{R} = \frac{2}{102} = \frac{1}{51},$$

c'est-à-dire que l'épaisseur de la paroi est $\frac{1}{51}$ du rayon extérieur.

XX. — Un cylindre de bois de hêtre flottant horizontalement sur l'eau (fig. 567), on demande le rapport du volume immergé au volume surnageant, sachant que le poids spécifique du hêtre est 0,852, et que celui de l'eau est 1.

Fig. 567.

Les deux volumes dont on cherche le rapport ayant même hauteur h, soient S et S′ les segments de cercle qui leur servent de base, le segment S étant immergé, et le segment S′ surnageant.

Le volume immergé est Sh, le volume surnageant $S'h$, et le volume total du cylindre est $(S + S)\,h$. Le poids du cylindre est donc $(S + S')\,h \times 0,852$, et celui de l'eau déplacée Sh; donc, d'après la condition d'équilibre des corps flottants, on doit avoir

$$(S + S')\,h \times 0,852 = Sh; \qquad \text{d'où } \frac{S'}{S} = \frac{1 - 0,852}{0,852} = 0,173.$$

XXI. — Un tube capillaire étant divisé en 180 parties d'égale capacité, on trouve qu'une colonne de mercure occupant 25 de ces divisions pèse 1gr,2 à zéro degré. Cela posé, voulant faire de ce tube un thermomètre, on demande le rayon intérieur du réservoir sphérique qu'on doit lui souder pour que ses 180 divisions comprennent 150 degrés centigrades.

Puisque 25 divisions du tube contiennent 1gr,2 de mercure, une seule division contient $\frac{1^{gr},2}{25}$, et les 180 divisions contiennent $\frac{1,2 \times 180}{25} = 8^{gr},64$. Ces 180 divisions devant comprendre 150 degrés, il s'en suit que le poids de mercure correspondant à un seul degré est $\frac{8^{gr},64}{150}$. Mais la dilatation correspondante à un degré n'étant autre que la dilatation apparente du mercure dans le verre (257), le poids $\frac{8^{gr},64}{150}$ doit être $\frac{1}{6480}$ du poids du mercure contenu dans le réservoir, poids égal à $\frac{4\pi R^3 \times 13,596}{3}$, R étant le rayon du réservoir, et le poids spécifique du mercure étant 13,596,

$$\text{donc on a } \frac{4\pi R^3 \times 13,596}{3} \times \frac{1}{6480} = \frac{8,64}{150}, \qquad \text{d'où } R = 1^c,8.$$

XXII. — Quel est l'effort F nécessaire pour soutenir une cloche pleine de mercure et plongée dans le même liquide, son diamètre intérieur étant de 6 centimètres, sa hauteur ob (fig. 568), au-dessus du niveau du bain, de 18 centimètres, et sachant que la hauteur du baromètre est 0m,77 ?

A l'extérieur, cette cloche supporte, de haut en bas, une pression égale au poids d'une colonne de mercure qui aurait pour base sa section *cd* et pour hauteur celle du baromètre; par conséquent, cette pression égale

$$\pi R^2 \times 0,77 \times 13,596.$$

A l'intérieur, elle supporte, de bas en haut, une pression égale à la pression atmosphérique, moins le poids d'une colonne de mercure qui aurait pour base sa section et pour hauteur *ob*; c'est-à-dire que la pression de bas en haut égale

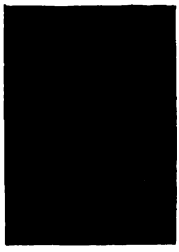


Fig. 568.

$$\pi R^2 \times (0,77 - 0,18) \times 13,596 = \pi R^2 \times 0,59 \times 13,596.$$

L'effort nécessaire pour soutenir la cloche sera donc égal à la différence de ces deux pressions ou à

$$\pi R^2 (0,77 - 0,59) \times 13,596 = \pi R^2 \times 0,18 \times 13,596$$

En faisant R = 3 centimètres, conformément à l'énoncé, et effectuant les calculs de l'expression ci-dessus, on trouve

$$F = 6^k,919^{gr},5.$$

XXIII. — On fait passer dans un vase vide, de 60 litres de capacité, et à parois inextensibles, 30 litres d'azote à la pression $0^m,72$; 15 litres d'oxygène à la pression $0^m,64$; et 5 litres d'acide carbonique à la pression $0^m,78$; quelle sera la force élastique du mélange ?

D'après la loi de Mariotte (150), la force élastique d'un gaz étant en raison inverse de son volume, chacun des gaz mélangés aura, après le mélange, une force élastique d'autant plus faible que son volume sera devenu plus grand. Par conséquent, l'azote passant du volume 30 au volume 60, c'est-à-dire à un volume double, sa force élastique sera deux fois moindre qu'elle n'était, ou $0^m,36$; de même l'oxygène prenant un volume quatre fois plus grand, sa tension sera le quart de $0^m,64$, ou $0^m,16$; enfin, l'acide carbonique prenant un volume douze fois plus grand, sa tension sera le douzième de $0^m,78$, ou $0^m,065$.

Donc, d'après la deuxième loi des mélanges des gaz (304), la force élastique du mélange sera

$$0^m,36 + 0^m,16 + 0^m,065 = 0^m,585.$$

XXIV. — Ayant laissé tomber une pierre dans un puits, le son que produit la pierre en rencontrant l'eau ne se fait entendre que 3 secondes après qu'on l'a lâchée. On demande à quelle profondeur est l'eau, sachant que le son parcourt 337 mètres par seconde.

Représentons par v la vitesse du son, par x la profondeur du puits jusqu'à l'eau, et par T le temps qui s'écoule entre le commencement de la chute et la perception du son. De la formule connue $e = \frac{1}{2} gt^2$ (55), on tire $t = \sqrt{\frac{2e}{g}} = \sqrt{\frac{2x}{g}}$; c'est le temps que la pierre met à tomber.

Pour trouver le temps qu'il faut au son pour arriver à l'oreille de l'observateur, observons que l'espace qu'il parcourt par seconde étant v, il lui faudra, pour parcourir l'espace x, autant de secondes que x contient de fois v, c'est-à-dire $\frac{x}{v}$.

On devra donc avoir

$$\sqrt{\frac{2x}{g}} + \frac{x}{v} = T, \qquad \text{ou} \sqrt{\frac{2x}{g}} = T - \frac{x}{v};$$

d'où
$$\frac{2x}{g} = T^2 - \frac{2Tx}{v} + \frac{x^2}{v^2}.$$

Chassant les dénominateurs et transposant, il vient

$$gx^2 - 2v(v + gT)x + v^2gT^2 = 0.$$

Résolvant,
$$x = \frac{v}{g}\left\{ gT + v \pm \sqrt{v(2gT + v)} \right\}$$

Remplaçant v, g et T par leurs valeurs, on trouve

$$x = \frac{337}{9,81}\left\{ 9,81 \times 3 + 337 \pm \sqrt{337(2 \times 9,81 \times 3 + 337)} \right\}$$

d'où
$$x = \frac{337}{9,81}(366,43 \pm 365,24);$$

ce qui donne les deux solutions $x = 25134^m,9$ et $x = 40^m,8$. La première est à rejeter, car elle représente un espace plus grand que celui que parcourt le son en 3 secondes. C'est une *solution étrangère* due à l'élévation au carré du radical $\sqrt{\frac{2x}{g}}$, dans l'équation du problème. La profondeur du puits est donc $40^m,8$.

FIN DES APPENDICES.

TABLE DES MATIÈRES

LIVRE PREMIER

MATIÈRE, FORCES ET MOUVEMENT

	Pages.
Matière, corps, atomes, molécules..	1
Masse, états des corps, phénomènes.	2
Lois, théories, agents physiques....	3
Propriétés générales.....	4
Impénétrabilité, étendue.....	4
Vernier	5
Machine à diviser	6
Divisibilité, porosité.....	8
Compressibilité	11
Elasticité.....	11
Mobilité, mouvement, repos.....	12
Inertie.....	13
Forces.....	13
Résultantes, composantes	15
Composition et décomposition.....	16
Mouvement uniforme, sa loi.....	18
Mouvement varié, ses lois.....	19
Proportionnalité des forces aux accélérations.....	20

LIVRE II

PESANTEUR ET ATTRACTION MOLÉCULAIRE

Attraction universelle, ses lois.....	22
Pesanteur, verticale, horizontale....	22
Densité absolue et densité relative..	24
Poids absolu, poids relatif.....	25
Centre de gravité, sa détermination.	26
Equilibre, divers états d'équilibre ..	29
Leviers.....	30
Balances.....	31
Méthode des doubles pesées.....	39
Lois de la chute des corps.....	39
Plan incliné.....	41
Machine d'Atwood.....	42
Formules sur la chute des corps	45
Causes qui modifient la pesanteur..	46
Mesure de la pesanteur.....	47
Pendule.....	48
Lois des oscillations du pendule.....	49
Longueur du pendule composé	50
Vérification des lois du pendule....	51
Usages du pendule.....	52
Problèmes sur la pesanteur..	53
Forces moléculaires.....	55
Cohésion, affinité, adhésion.....	56
Propriétés particulières.....	57
Elasticité..... ...	57
Ténacité.....	60
Dynamomètre de Perreaux.....	62
Ductilité	63
Dureté, trempe.....	64

LIVRE III

DES LIQUIDES

Hydrostatique.....	65
Caractères généraux des liquides...	65
Compressibilité des liquides.....	65
Principe d'égalité de pression.....	66
Pressions dans les liquides.....	68
Pression de haut en bas, ses lois...	69
Poussée de bas en haut.....	69
La pression est indépendante de la forme des vases.....	70
Pression sur les parois latérales....	72
Tourniquet hydraulique.....	73

Pages.

Paradoxe hydrostatique..... 74

Conditions d'équilibre des liquides.. 75
Equilibre dans un seul vase..... 75
Equilibre dans des vases communiquants..... 76
Equilibre des liquides superposés... 77
Equilibre de deux liquides hétérogènes..... 77

Presse hydraulique..... 78
Niveau d'eau..... 81
Niveau à bulle d'air..... 82
Cours d'eau, puits artésiens..... 83

Pressions que supportent les corps plongés dans les liquides..... 84
Principe d'Archimède..... 85
Détermination des volumes..... 87
Equilibre des corps plongés et des corps flottants..... 87

Ludion, vessie natatoire, natation... 89

Poids spécifiques des solides..... 90
Aréomètre de Nicholson..... 91
Poids spécifiques des liquides..... 93
Aréomètre de Fahrenheit..... 93
Usage des poids spécifiques..... 95

Aréomètre à volume variable..... 96
Aréomètre de Baumé..... 96
Alcoomètre de Gay-Lussac..... 97
Pèse-sels..... 99
Densimètres..... 99

Capillarité..... 101
Ses lois dans les tubes..... 101

Endosmose et exosmose..... 105
Absorption et imbibition..... 106
Absorption dans les plantes..... 107
Absorption dans les animaux..... 107

LIVRE IV

DES GAZ

Propriétés des gaz..... 108
Force expansive..... 109
Transvasement des gaz..... 110
Poids des gaz..... 110
Pression exercée par les gaz..... 111
Atmosphère, sa composition..... 111
Crève-vessie..... 112
Hémisphères de Magdebourg..... 113

Baromètres..... 114
Expérience de Torricelli..... 114
Expériences de Pascal..... 115
Valeur de la pression atmosphérique. 115
Baromètre à cuvette..... 116
Baromètre de Fortin..... 118
Baromètre de Gay-Lussac..... 119
Corrections à faire dans les observations barométriques..... 121
Variation de la hauteur barométrique, ses causes..... 122
Baromètre à cadran..... 125
Mesure des hauteurs par le baromètre. 126

Mesure de la force élastique des gaz. 127
Loi de Mariotte..... 127
Problèmes sur la loi de Mariotte..... 131
Manomètre à air libre..... 132
Manomètre à air comprimé..... 133
Manomètre de Bourdon..... 135
Baromètre du même..... 135
Lois des mélanges gazeux..... 136
Mélange des gaz et des liquides..... 137
Equilibre des fluides dont les diverses parties n'ont pas la même densité. 138
Baroscope..... 139
Aérostats..... 140
Parachute..... 145
Poids que peut enlever un ballon..... 147

Machine pneumatique..... 147
Eprouvette de la machine pneumat.. 150
Robinet à double épuisement..... 151
Usages de la machine pneumatique.. 152
Machine pneumatique à double effet. 154
Machine de compression..... 156
Pompe de compression..... 157
Fontaine de Héron..... 158
Fontaine intermittente..... 159
Siphon..... 160
Siphon à écoulement constant..... 162
Siphon intermittent..... 162
Pompes..... 163
Charge que porte le piston..... 167
Flacon de Mariotte..... 167

LIVRE V

ACOUSTIQUE

Son et bruit..... 169
Sonnerie dans le vide..... 170
Propagation du son..... 171
Intensité du son..... 173

Pages.
Vitesse du son dans les gaz..... 176
Vitesse dans les solides et les liquides..... 178
Réflexion du son..... 178
Réfraction du son..... 179
Echos et résonnances..... 180
Porte-voix, cornet acoustique..... 181

Vibrations des cordes..... 182
Lois des vibrations des cordes..... 183
Nœuds et lignes nodales..... 184
Roue de Savart..... 185
Sirène..... 186
Limite des sons perceptibles..... 188

Théorie physique de la musique.... 190
Qualité du son musical..... 190

Pages.
Echelle musicale..... 191
Nombre des vibrations..... 192
Longueur des ondes..... 193
Intervalles, dièses, bémols..... 194
Accord parfait, dissonance..... 194
Battements..... 195
Diapason..... 195

Vibration de l'air dans les tuyaux.. 195
Tuyaux sonores..... 195
Instruments à bouche..... 196
Instruments à anche..... 197
Lois de Bernoulli..... 198
Vibrations des verges et des lames.. 201
Vibrations des plaques..... 202
Vibrations des membranes..... 203
Expériences de M. Lissajous..... 204

LIVRE VI

CALORIQUE

Hypothèses sur la nature de la chaleur 211
Effets du calorique..... 212

Thermomètres..... 213
Calibrage du tube..... 214
Remplissage du thermomètre..... 215
Graduation..... 216
Echelles thermométriques..... 220
Déplacement du zéro..... 221
Limites du thermomètre à mercure.. 222
Thermomètre à alcool..... 222
Thermomètre différentiel..... 222
Thermoscope..... 223
Thermomètre de Breguet..... 224
Thermomètre à maxima et à minima. 225
Thermomètre de Walferdin..... 226
Pyromètre de Wedgwood..... 227
Pyromètre de Brongniart..... 228
Thermométrographe..... 229

Dilatation des solides..... 229
Dilatation linéaire et dilation cubique, coefficients de dilatation..... 229
Mesure des coefficients de dilatation 230
Formules et problèmes..... 232
Pendule compensateur..... 234

Dilatation des liquides..... 236
Dilatation absolue du mercure..... 237
Dilatation apparente..... 238
Dilatation des divers liquides..... 239
Correction de la hauteur barométrique..... 240
Maximum de densité de l'eau..... 240

Dilatation des gaz..... 241
Problèmes..... 243
Expériences de M. Regnault..... 245
Thermomètre à air..... 247
Densité des gaz..... 248

Changements d'état..... 251
Fusion, ses lois..... 251
Calorique latent..... 252
Dissolution..... 252
Solidification, ses lois..... 253
Cristallisation..... 253
Congélation de l'eau..... 253
Mélanges réfrigérants..... 255

Vapeurs..... 256
Force élastique des vapeurs..... 257
Vaporisation dans le vide..... 257
Espace saturé, maximum de tension 258
Tension au-dessous de zéro..... 259
Tension de zéro à cent degrés..... 260
Tension au-dessus de cent degrés... 261
Tables des forces élastiques..... 263
Tension dans deux vases inégalement chauds..... 266
Causes qui accélèrent l'évaporation. 267
Ebullition, ses lois..... 267
Causes qui modifient la température d'ébullition..... 269
Marmite de Papin..... 271
Calorique latent des vapeurs..... 273
Congélation du mercure..... 273

Liquéfaction des vapeurs..... 274
Distillation, alambics..... 275
Absorption, tubes de sûreté..... 276
Liquéfaction des gaz..... 278
Liquéfaction de l'acide carbonique.. 279
Liquéfaction du protoxyde d'azote... 281

Mélanges des gaz et des vapeurs, lois..... 281
Problèmes sur les mélanges des gaz et des vapeurs..... 286
Etat sphéroïdal..... 287
Expériences de M. Boutigny..... 287

Pages

Densité des vapeurs..... 288
Méthode de Gay-Lussac..... 288
Méthode de M. Dumas..... 289

Hygrométrie..... 291
Etat hygrométrique..... 291
Hygromètre chimique..... 293
Hygromètre à cheveu..... 293
Table de Gay-Lussac..... 295
Hygromètre de Daniell..... 297
Hygromètre de M. Regnault..... 299
Hygroscope..... 300
Problème sur l'hygrométrie..... 300

Conductibilité..... 301
Conductibilité des solides..... 301
Conductibilité des liquides..... 304
Mode d'échauffement des liquides... 304
Conductibilité des gaz..... 305

Calorimétrie..... 306
Calorie..... 306
Calorique spécifique..... 306
Méthode des mélanges..... 307
Méthode du calorimètre..... 309
Calorique spécifique des liquides.... 310
Lois de Dulong..... 311
Calorique spécifique des gaz..... 312
Calorique latent de fusion..... 312
Calorique latent des vapeurs..... 313
Problèmes..... 314
Théorie dynamique de la chaleur.... 316

Rayonnement du calorique..... 317
Lois du rayonnement..... 317
Intensité du calorique rayonnant.... 318
Equilibre mobile de température.... 321
Loi de Newton sur le refroidissement. 321

Réflexion du calorique..... 322
Lois de la réflexion..... 322

Pages.

Leur démonstration..... 324
Réflexion dans le vide..... 325
Réflexion apparente du froid..... 326
Pouvoir réflecteur..... 328
Pouvoir absorbant..... 328
Pouvoir émissif..... 329
Causes qui les modifient..... 330
Applications..... 331

Pouvoir diathermane..... 332
Causes qui le modifient..... 333
Diffusion..... 336

Machines à vapeur..... 336
Générateur..... 336
Machine de Watt..... 338
Machine à simple effet..... 341
Locomotive..... 343
Machines à réaction, éolipyle..... 346
Basse, haute, moyenne pressions, détente..... 347
Cheval-vapeur..... 347

Sources de chaleur..... 347
Sources mécaniques..... 348
Sources physiques..... 349
Radiation solaire..... 349
Chaleur terrestre..... 350
Chaleur dégagée par l'imbibition... 350
Sources chimiques..... 352
Combustion..... 352
Chaleur dégagée par la combustion.. 353

Chauffage..... 354
Cheminées..... 354
Tirage des cheminées..... 355
Poêles..... 357
Chauffage par la vapeur..... 357
Chauffage à air chaud..... 357
Chauffage par circulation d'eau chaude 358
Sources de froid..... 360

LIVRE VII

LUMIÈRE

Hypothèses sur la lumière..... 362
Corps lumineux, diaphanes, opaques; rayons, faisceaux..... 363
Propagation de la lumière..... 363
Ombre, pénombre..... 364
Images par de petites ouvertures... 365
Vitesse de la lumière..... 367
Lois de l'intensité de la lumière.... 370
Photomètres..... 372

Réflexion de la lumière..... 374
Lois de la réflexion..... 374
Miroirs plans..... 376
Images virtuelles et images réelles.. 377
Images multiples..... 378
Réflexion irrégulière..... 379

Intensité de la lumière réfléchie..... 380

Miroirs sphériques..... 380
Foyers des miroirs concaves..... 381
Foyers des miroirs convexes..... 384
Détermination des foyers..... 385
Formation des images dans les miroirs concaves..... 386
Formation dans les miroirs convexes. 388
Règle pour la construction des images. 389
Formules des miroirs sphériques.... 389
Calcul de la grandeur des images... 391
Aberration de sphéricité..... 391
Applications des miroirs..... 392
Miroirs paraboliques..... 392

Pages.

Réfraction 394
Lois de la réfraction..... 394
Indice de réfraction..... 395
Effets produits par la réfraction.... 395
Angle limite, réflexion intérieure... 397
Mirage..... 398

Transmission de la lumière au travers des milieux diaphanes..... 399
Milieux à faces parallèles..... 399
Prismes..... 399
Marche des rayons dans les prismes. 400
Condition d'émergence..... 400
Déviation minimum..... 401
Mesure des indices de réfraction.... 402

Lentilles 404
Foyers dans les lentilles..... 406
Détermination du foyer principal.... 409
Centre optique, axe secondaire..... 409
Formation des images..... 411
Règle pour leur construction..... 413
Aberration de sphéricité..... 414
Formules des lentilles..... 414
Mesure du grossissement..... 416

Dispersion 416
Spectre solaire..... 416
Couleurs simples..... 418
Recomposition de la lumière..... 420
Théorie de Newton..... 422
Couleurs complémentaires..... 423
Propriétés du spectre..... 423
Raies du spectre..... 424
Objets vus au travers des prismes... 424
Aberration de réfrangibilité..... 425
Achromatisme..... 426
Absorption par les milieux transparents..... 427

Instruments d'optique..... 427
Microscope simple..... 428
Microscope composé..... 429
Mesure du grossissement..... 429
Microscope d'Amici..... 431
Lunette astronomique..... 431
Lunette terrestre..... 436
Oculaires..... 437
Lunette de Galilée..... 438
Télescopes..... 439
Chambre obscure..... 443
Chambre claire..... 445
Daguerréotype..... 447
Photographie sur papier..... 451
Photographie sur verre..... 453
Photographie sur plaques albuminées..... 453
Lanterne magique..... 454
Microscope solaire..... 455
Microscope photo-électrique..... 457
Lentilles à échelons..... 459

Pages.

Vision..... 461
Structure de l'œil..... 461
Marche des rayons dans l'œil..... 463
Angle optique, angle visuel..... 464
Appréciation des distances..... 465
Distance de la vue distincte..... 465
Théorie de Sturm..... 467
Vue simple avec les deux yeux..... 468
Stéréoscope..... 469
Partie insensible de la rétine..... 469
Persistance de l'impression sur la rétine..... 469
Images accidentelles. Irradiation.... 470
Auréole accidentelle..... 470
Non-achromatisme de l'œil..... 471
Myopie, presbytisme..... 471
Besicles..... 472
Diplopie et achromatopsie..... 472
Sources de lumière..... 473

Double réfraction..... 474
Cristaux à un axe..... 475
Rayon ordinaire et rayon extraordinaire 475
Lois de la double réfraction dans les cristaux à un axe..... 476
Lois dans les cristaux à deux axes.. 476

Diffraction et franges..... 477
Interférences..... 478
Longueur des ondulations, cause des couleurs 479
Couleurs des lames minces, anneaux de Newton..... 480
Réseaux..... 481

Polarisation 481
Polarisation par réflexion..... 481
Polarisation par simple réfraction.. 482
Polarisation par double réfraction... 482
Polariscopes ou analyseurs..... 483
Appareil de Noremberg..... 484

Polarisation rotatoire..... 486
Coloration de la lumière polarisée... 486
Pouvoir rotatoire des liquides 487
Saccharimètre..... 488
Application du saccharimètre..... 492

Colorations par l'interférence des rayons polarisés..... 492
Lois de l'interférence des rayons polarisés..... 492
Teintes produites par les lames minces 493
Théorie de la coloration de la lumière polarisée 494
Anneaux produits par la lumière polarisée 495
Colorations par le verre trempé ou comprimé..... 498
Polarisation du calorique..... 498

LIVRE VIII

MAGNÉTISME

Pages.
Aimants naturels et artificiels.... 498
Pôles et ligne neutre..... 500
Action mutuelle des pôles..... 501
Fluides magnétiques..... 502
Substances magnétiques..... 503
Aimantation par influence..... 503
Force coercitive..... 504
Corps diamagnétiques..... 504

Magnétisme terrestre..... 505
Action directrice de la terre..... 505
Méridien magnétique, déclinaison... 507
Boussole de déclinaison..... 508
Méthode du retournement..... 510
Boussole marine..... 511

Pages.
Inclinaison..... 512
Boussole d'inclinaison..... 513
Aiguille astatique..... 515

Aimantation..... 515
Sources d'aimantation..... 515
Méthode de la simple touche..... 515
Méthode de la touche séparée..... 516
Méthode de la double touche 516
Aimantation par l'action de la terre. 517
Faisceaux magnétiques..... 517

Lois des actions magnétiques..... 519
Mesure du magnétisme terrestre... 522

LIVRE IX

ÉLECTRICITÉ STATIQUE

Hypothèses sur la nature de l'électricité..... 523
Electricités statique et dynamique.. 524
Electrisation par le frottement..... 524
Corps conducteurs..... 525
Corps isolants, réservoir commun... 526
Deux espèces d'électricités..... 527
Théorie de Symner et de Franklin.. 528
Actions mutuelles des deux électricités..... 529
Loi de l'électrisation par le frottement..... 529
Electrisation par pression..... 530

Mesure des forces électriques..... 531
Lois des attractions et des répulsions. 531
Objections aux lois de Coulomb..... 533
L'electricité se porte à la surface des corps..... 534
Influence de la forme des corps..... 538
Pouvoir des pointes..... 539
Electrisation des corps en contact.. 540
Déperdition de l'électricité..... 541

Electrisation par influence..... 541
Théorie de M. Faraday..... 543
Communication de l'électricité à distance..... 546
Mouvements des corps électrisés.... 547
Electroscope à feuille d'or..... 548
Electrophore..... 549
Machine électrique..... 550

Coussins de Steiner..... 552
Electromètre à cadran..... 554
Conducteurs secondaires..... 555
Machine de Nairne..... 555
Machine de Van-Marum..... 556
Machine d'Armstrong..... 557

Expériences diverses..... 559
Tabouret électrique..... 559
Carillon électrique..... 560
Tourniquet électrique, insufflation.. 562

Electricité dissimulée..... 563
Condensateur d'Æpinus 564
Autre théorie des condensateurs. .. 565
Limite de la charge..... 566
Calcul de la force condensante 566
Décharge lente et décharge instantan. 567
Carreau fulminant..... 569
Bouteille de Leyde..... 570
Bouteille à armature mobile..... 572
Jarres et batteries..... 574
Electromètre condensateur 576

Effets de l'électricité..... 577
Effets physiologiques..... 577
Effets lumineux..... 578
Effets calorifiques..... 581
Effets mécaniques..... 582
Effets chimiques..... 581
Pistolet de Volta..... 584
Eudiomètre..... 585